

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Návrh vláknově optického senzoru na bázi Mach-Zehnderova
interferometru pro měření vybraných parametrů v dopravním
provozu**

**Proposal fiber optical sensor based on Mach-Zehnder
interferometer for measurement of selected parameters in the
traffic**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Matoušek**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Návrh vláknově optického senzoru na bázi Mach-Zehnderova interferometru pro měření vybraných parametrů v dopravním provozu**
Proposal fiber optical sensor based on Mach-Zehnder interferometer for measurement of selected parameters in the traffic

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Vláknově optické senzory patří mezi klíčové technologie budoucnosti. Umožňují velmi citlivé snímání, jsou plně pasivní a imunní vůči elektromagnetickému rušení, jejich výstup je při vhodné konstrukci přímo napojitelný na stávající telekomunikační vláknově optické sítě. Cílem této práce je návrh typu vláknově optického senzoru na bázi Mach-Zehnderova interferometru pro měření vybraných parametrů v dopravním provozu. Jedná se převážně o praktickou práci, náplní studenta bude navrhnout a realizovat senzor, dále analyzovat naměřená data z praktických měření.

1. Zpracujte rešerši o principech činnosti vláknově optických interferometrů.
2. Sestavte prototyp vybraného optovláknového Mach-Zehnderova interferometru.
3. Proveďte měření šumového pozadí M-Z interferometru měřicí kartou NI USB-6210.
4. Proveďte měření vybraných parametrů testovacích vozidel v dopravním provozu.
5. Porovnejte naměřená data vzhledem k šumovému pozadí interferometru, vyhodnoťte úspěšnost detekce testovacích vozidel a jejich rychlosti.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] LOPEZ-HIGUERA, Jose Miguel. Handbook of optical fibre sensing technology. New York: Wiley, 2002, xxix, 795 p. ISBN 0471820539.


[2] GOODWIN, Eric P a James C WYANT. Field guide to interferometric optical testing. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2006, xii, 100 p. SPIE field guides, FG10. ISBN 9780819465108.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Nedoma**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 24. dubna 2017

Mašoušek
.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Nedomovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem práce bylo provést rešerši o principech činnosti vláknově optických interferometrů, nastudovat jejich funkcionality a na základě nabitých poznatků sestavit senzor, který dokáže detekovat projíždějící vozidlo nejvyšší možnou úspěšností. Výstupem práce je sestavení funkčního vzorku senzoru, který využívá výhod optických vláken jako je imunita vůči elektromagnetickému rušení, pasivita z hlediska napájení elektrickou energií a umožňuje detekovat průjezdy automobilů. Práce dále přináší úvodní poznatky z oblasti monitorování rychlosti vozidel, kdy se využívá dvou totožných senzorických jednotek v pevně definované vzdálenosti a rychlost je vypočtena na základě časového rozdílu průjezdu automobilů během průjezdu kolem obou senzorických jednotek.

Klíčová slova

Světlo, optická vlákna, interferometr, interferometrie, Mach-Zehnderův interferometr, disperze, koherence, interference, numerická apertura, index lomu, zákon lomu, zákon odrazu, interferometrie

Abstract

The aim of the work was to investigate the principles of fiber optic interferometers, to study their functionality, and to build a sensor that can detect the passing vehicle with the highest possible success. The output of the thesis is the assembly of a functional sample of a sensor that uses the advantages of optical fibers such as immunity to electromagnetic interference, passivity in terms of power supply and allows detection of car passes. The thesis also introduces introductory findings from the field of vehicle speed monitoring using two identical sensor units at a fixed distance and the speed is calculated based on the time difference of the passage of cars during the passage around the two sensing units.

Key words

Light, an optical fiber interferometer, interferometry, Mach-Zehnder interferometer, a dispersion, coherence, interference, numerical aperture, the refractive index, refraction law, the law of reflection, interferometry

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 10 -
Seznam použitých zkratk.....	- 11 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	- 12 -
Úvod.....	- 14 -
1 Teoretická část.....	- 15 -
1.1 Optovláknové senzory.....	- 15 -
1.2 Světlo	- 15 -
1.3 Zákon odrazu.....	- 16 -
1.4 Zákon lomu (Snellův zákon).....	- 17 -
1.5 Disperze světla	- 18 -
1.6 Optická vlákna	- 19 -
1.6.1 Šířka pásma optického vlákna	- 20 -
1.6.2 Numerická apertura - NA	- 21 -
1.6.3 Disperze.....	- 22 -
1.6.4 Vidová disperze.....	- 23 -
1.6.5 Chromatická disperze	- 23 -
1.6.6 Polarizační vidová disperze.....	- 24 -
1.6.7 Útlum světelného paprsku v optickém vláknu	- 24 -
1.6.8 Útlum vzniklý absorpcí	- 25 -
1.6.9 Rayleighův rozptyl	- 26 -
1.6.10 Ohyb vlákna	- 26 -
1.6.11 Ztráty na makroskopických neregularitách	- 27 -
1.6.12 Odraz paprsků.....	- 27 -
1.6.13 Vazební ztráty na spojích optického vlákna	- 28 -
1.6.14 Radiální odchylka.....	- 28 -
1.6.15 Axiální posuv	- 28 -
1.6.16 Úhlový posuv	- 29 -
1.6.17 Obsah OH iontů.....	- 29 -
1.6.18 Parametr MFD (Mode FieldDiameter)	- 29 -
1.7 Interference	- 30 -
1.7.1 Koherence záření.....	- 30 -

Seznam použitých symbolů

1.7.2	Časová koherence	- 30 -
1.7.3	Prostorová koherence	- 31 -
1.8	Interferometrie	- 31 -
1.8.1	Interferometry.....	- 31 -
1.8.2	Nejpoužívanější typy interferometrických přístrojů.....	- 32 -
2	Praktická část	- 36 -
2.1	Vlastní konstrukce senzoru s M-Z interferometrem	- 36 -
2.1.1	Použité přístroje pro měření:	- 37 -
2.1.2	Popis konstrukce senzoru	- 38 -
2.2	Zpracování signálu.....	- 41 -
2.2.1	Testování funkčnosti senzoru Vlastní měření	- 42 -
2.2.2	Provedené praktické měření vozidel	- 44 -
2.2.3	Měření rychlosti vozidel.....	- 46 -
3	Závěr	- 48 -
4	Použitá Literatura:	- 49 -
5	Seznam příloh.....	- 51 -

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
A	dB/km	Měrný útlum
I	A	Proud
L	m	Délka zázněje
NA		Numerická apertura
P	W	Výkon
U	V	Napětí
c	m/s	Rychlost světla
f	Hz	Frekvence
n		Index lomu
r	m	Poloměr
s	m	Dráha
t	s	Čas
v	m/s	Rychlost
α	°	úhel
β	°	úhel
λ	m	Vlnová délka
ϕ	°	úhel

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
CRT	Cathode ray tube
DFB	Distributed Feedback
MFD	Mode Field Diameter
OH	Ionty vody
OLED	Organic light emitting diod
PbSe	Olovo a selen
RGB	Red, green, blue

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Odraz světla	16
1.2	Lom světla	17
1.3	Rozklad světla na hranolu	18
1.4	Jednovidové optické vlákno	20
1.5	Vícevidové optické vlákno	20
1.6	Gradientní optické vlákno	20
1.7	Navázání paprsku do pláště	22
1.8	Útlum paprsku ve vlákne v závislosti na vlnové délce	25
1.9	Sagnacův interferometr	32
1.10	Michelsonův interferometr	33
1.11	Mach-Zehnderův interferometr	34
1.12	Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr	35
2.1	Kompletní schéma využití při měření vláknově optického M-Z interferometru	37
2.2	Zde je ukázána plastová bedna, která je použita jako ochrana vnitřní struktury, ale také pomáhá přenášet vibrace do senzorické části obvodu.	38
2.3	Zde je ukázaný polystyren, který slouží jako izolace referenční části vnitřního obvodu. Polystyren jsem vyříznul tak, aby přesně pasoval do již zmíněné bedny.	38
2.4	V jedné desce polystyrenu jsem plynovou páječkou vypálil otvor pro uložení děličů a referenční části obvodu.	39
2.5	Zde je příprava uložení vnitřní části.	39
2.6	Na tomto obrázku už je uložení referenční části v polystyrenu zcela hotové.	40
2.7	Zde je vidět senzorická část a v pravé části obrázku si můžeme povšimnout i vyříznutí drážek v polystyrenu aby ohyby vláken nebyly příliš velké.	40

2.8	Toto jsou plastové průchodky, které slouží k utěsnění senzoru proti přírodním vlivům	41
2.9	Takto vypadá složený senzor	41
2.10	Část struktury aplikace	42
2.11	Hlavní okno aplikace	42
2.12	Průběh signálu v závislosti na čase	43
2.13	Frekvenční spektrum	43
2.14	Aplikace pro dlouhodobé měření	44
2.15	Průjezd vozu Škoda Felicia a její amplitudová odezva v závislosti na čase	45
2.16	Průjezd vozu Peugeot 206 a jeho amplitudová odezva v závislosti na čase.	45
2.17	Zjednodušené schéma pro měření rychlosti vozidel.	46
2.18	Typický záznam měření rychlosti testovacího vozidla.	47

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
1.1	Tabulka naměřených a vyhodnocených rychlostí, jako reference bylo použito GPS zařízení.	46

Úvod

V současné době jsou ve velké míře využívána optická vlákna. Optická vlákna mohou přenášet data, vést světlo nebo je lze využít k měření různých veličin. Právě poslední jmenovaná možnost je velmi žádoucí, protože využití laseru a kvalitních optických vláken zajišťuje velmi přesné výsledky a současně i zachování nízké ceny. Dalšími výhodami optických vláken je imunita vůči elektromagnetickému rušení a pasivita z hlediska napájení elektrickou energií.

Výstupem práce je sestavení funkčního vzorku senzoru, který využívá výhod optických vláken, zejména imunity vůči elektromagnetickému rušení, pasivity z hlediska napájení elektrickou energií a také umožňuje detekovat průjezdy automobilů. Práce dále přináší úvodní poznatky z oblasti monitorování rychlosti vozidel. Využívá se dvou totožných senzorických jednotek v pevně definované vzdálenosti, kdy rychlost je vypočtena na základě časového rozdílu průjezdu automobilů kolem obou senzorických jednotek.

Pro samotné měření jsem musel nejprve sestavit dostatečně kvalitní senzor a ověřit jeho funkčnost. Funkčnost jsem nejprve testoval v laboratorních podmínkách a následně jsem testoval, zda bude úspěšně detekovat průjezdy vozidel. Před každým testováním a měřením vozidel jsem stanovil hodnotu šumového pozadí a na základě této hodnoty nastavil úroveň pro detekci vozidel. Když se senzor ukázal dostatečně kvalitní, bylo nutné sestavit ještě druhý senzor totožný s prvním. K měření rychlosti vozidel jsem použil dvě stejné senzorické jednotky, které jsem umístil za sebou (paralelně) na trase projíždějících vozidel. Mezi oběma jednotkami jsem stanovil konstantní vzdálenost. Při průjezdu automobilu byl zaznamenán čas na každé senzorické jednotce. Rychlost jsem vypočetl na základě rozdílu časů zaznamenaných na senzorických jednotkách.

1 Teoretická část

1.1 Optovláknové senzory

Jsou to moderní senzory využívající ke své činnosti vlastnosti optických vláken a světla. Jako zdroj světla se dnes většinou používají různé typy laserů nebo pro méně náročné aplikace se používají svítivé diody. Optická vlákna mohou přenášet buď obraz samotný, nebo díky určitým vlastnostem mohou modifikovat paprsek světla uvnitř vlákna. Vlastnosti upravující paprsek světla v optickém vlákne mohou vycházet už ze základních parametrů optických vláken nebo různými modifikacemi samotných vláken při aplikaci nebo rovnou při výrobě. Optovláknové senzory nesnímají sledovanou veličinu přímo, ale pouze její vliv na světelný paprsek v optickém vlákne. Snímá se tedy změna výkonu nebo změna fáze.

Použití optovláknových senzorů je výhodné díky malým rozměrům, nízké hmotnosti a odolnosti proti elektromagnetickému rušení. Jsou také velmi přesné i v porovnání s těmi nejlepšími klasickými senzory.

Optovláknové senzory se dělí na dvě skupiny. Intenzitní a interferometrické.

Intenzitní optovláknové senzory snímají změny intenzity světelného paprsku v optickém vlákne.

Interferometrické optovláknové senzory snímají deformaci světelného paprsku po průchodu vlákem. Interferometrické optovláknové senzory používají k měření dvě optická vlákna. Jedno vlákno je referenční. Zde se snažíme o to, aby měřená veličina ovlivňovala toto vlákno co nejméně. Druhé vlákno slouží jako senzor a měřená veličina by na něj měla působit pokud možno co nejvíce. Světelný paprsek se po průchodu vlákny spojí a na optickém snímači zjistíme odchylky způsobené vlivem sledované veličiny. Interferometrické senzory mají velkou výhodu ve vysoké rozlišovací schopnosti díky porovnávání signálů. Dalšími skupinami jsou, intrinzitní, kde veličina působí přímo na optické vlákno a extrinzitní, kde veličina působí na prvek vložený do optického vlákna, který upravuje paprsek světla v optickém vlákne.

Pomocí optovláknových senzorů můžeme snímat různé veličiny. Například teplotu, tlak, vibrace, mechanické napětí, posuv.

1.2 Světlo

Je to část elektromagnetického spektra, kterou vnímá lidské oko. Spektrum viditelného světla se pohybuje mezi infračerveným zářením, které má vlnovou délku přibližně 790nm a ultrafialovým zářením, které má vlnovou délku přibližně 390nm.

Základní charakteristiky světla jsou svítivost, světelný tok, barva (frekvence, vlnová délka), koherence a polarizace.

Zdroje světla můžeme rozdělit na několik skupin. Přírodní zdroje světla jsou hvězdy nebo oheň. Umělé zdroje světla jsou třeba žárovky, zářivky, výbojky, laser. Chromatické světlo je světlo složené z různých barev. Dobrým příkladem zdroje chromatického světla je OLED monitor nebo CRT

kde se světlo skládá ze tří barev (červená, zelená, modrá (RGB)). Monochromatický (koherentní) zdroj světla je třeba laser. Koherentní zdroj světla má pouze jednu vlnovou délku.

Světlo se ve vakuu šíří rychlostí přibližně $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, ale tato rychlost se mění v závislosti na optickém prostředí. Optické prostředí můžeme také rozdělit na několik druhů. V průhledném prostředí nedochází k rozptylu světla. Průhledné prostředí je například sklo. V průsvitném prostředí se světlo částečně rozptyluje. Průsvitné prostředí je například matné sklo. V neprůhledném prostředí se světlo buď pohltí, nebo odrazí. Neprůhledné prostředí jsou třeba kovy. Dalšími typy optických prostředí jsou homogenita, izotropie a anizotropie. Homogenní prostředí má všude stejné optické vlastnosti. Světlo se v tomto prostředí šíří přímočaře a jednotlivé světelné paprsky se mohou protínat, bez toho aniž by se ovlivňovaly. V izotropním se světlo šíří stejně rychle. V anizotropním prostředí se světlo šíří různou rychlostí v závislosti na směru šíření. Příkladem anizotropního prostředí může být krystal křemene.

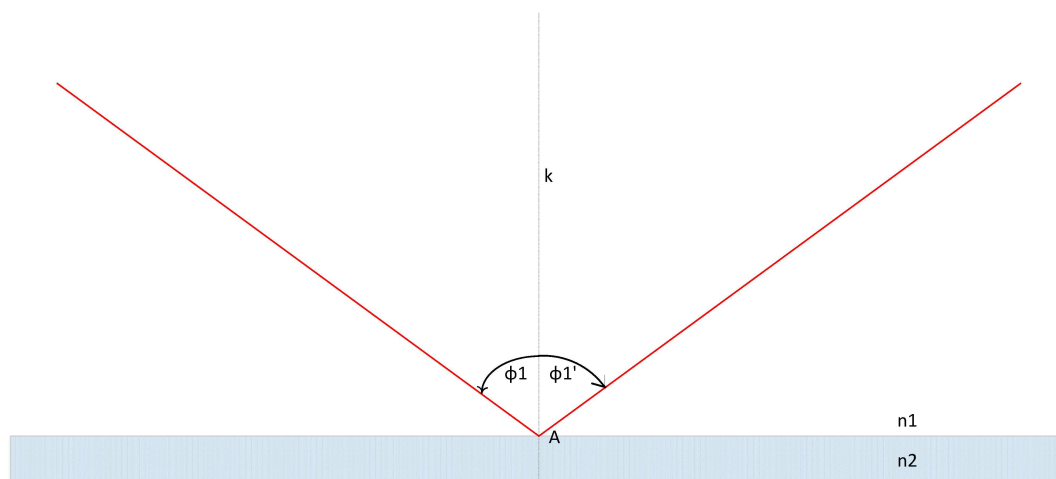
Odraz světla též reflexe světla vznikne, pokud paprsek světla dopadne na rozhraní prostředí, do kterého nemůže část nebo celek proniknout. Částečný odraz můžeme pozorovat například tehdy, posvítíme-li laserem do mlhy.

1.3 Zákon odrazu

Na rozhraní optických prostředí dopadá světelný paprsek v bodě A. Kolmice vztyčená v tomto bodě svírá s dopadajícím paprskem úhel α . V případě, že je rozhraní tvořeno zakřivenou plochou, je kolmice vztyčena na tečnou rovinu v bodě dopadu světelného paprsku. Dopadající paprsek a kolmice dopadu leží v takzvané rovině dopadu. Odražený paprsek se od místa dopadu šíří pod úhlem α' , který svírá s kolmicí dopadu.

Velikost úhlu odrazu α' se rovná velikosti úhlu dopadu α . Odražený paprsek leží v rovině dopadu.

Lom světla též refrakce nastává, pokud světlo prochází z jednoho prostředí do druhého prostředí.



Obrázek 1.1: Odraz světla

1.4 Zákon lomu (Snellův zákon)

V bodě A pod úhlem α dopadá světlo na rozhraní dvou prostředí. Rozhraní může být rovné nebo zakřivené. Zakřivená plocha je v bodě dopadu světelného paprsku nahrazena tečnou rovinou. Kolmice k této rovině se nazývá kolmice dopadu (k). Světelný paprsek a kolmice dopadu leží v rovině, kterou nazýváme rovinou dopadu. Druhým prostředím směřuje lomený paprsek v bodě A pod úhlem lomu β . Leží v rovině dopadu. Úhel lomu paprsku se měří od kolmice dopadu.

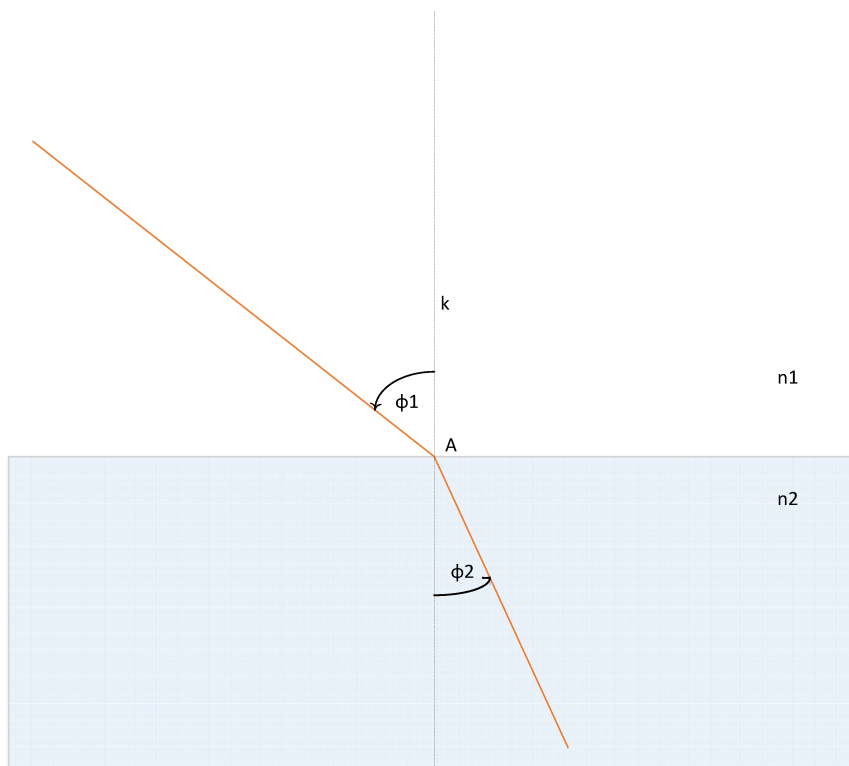
Zákon lomu vyjádřený matematicky je: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2}$

(n_1 je index lomu prostředí, kterým paprsek prochází, než dojde k lomu, n_2 index lomu prostředí, do kterého paprsek prochází)

Index lomu n je poměr rychlosti světla ve vakuu a rychlost světla v daném prostředí. Matematicky vyjádření je: $n = \frac{c}{v}$

Lom nastává, pokud světlo prochází z opticky řidšího prostředí do prostředí opticky hustšího, nebo naopak z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího. Opticky hustší prostředí má větší index lomu.

Snellův zákon říká, že při přechodu světla z opticky řidšího prostředí do opticky hustšího prostředí nastává lom světla ke kolmici a pokud světlo přechází z opticky hustšího prostředí do prostředí opticky řidšího, nastane lom světla od kolmice.



Obrázek 1.2: Lom světla

Při lomu světla může dojít i k úplnému odrazu, pokud je úhel dopadu větší než mezní úhel.

Mezní úhel můžeme vypočítat z matematického vzorce:

$$\frac{\sin \alpha_m}{\sin 90^\circ} = \frac{\sin \alpha_m}{1} = \sin \alpha_m = \frac{n_1}{n_2}$$

Lom světla se využívá u optických vláken, čoček nebo také nových světlometů.

Lom můžeme pozorovat dobře při pokusu s tyčí ve vodě. Hůl do vody ponořená zdá se být přelomená.

1.5 Disperze světla

Při lomu světla může docházet k rozkladu světla na jednotlivé vlnové délky, díky závislosti rychlosti světla v látce na frekvenci. Ve vakuu k disperzi světla nedochází.

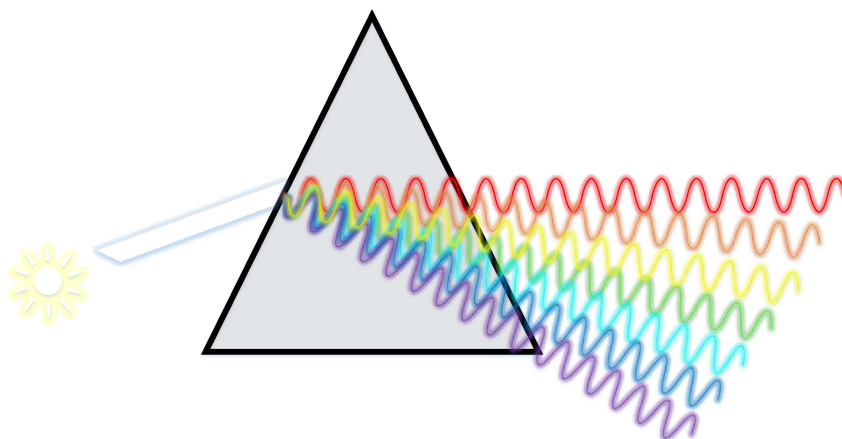
Index lomu je také závislý na frekvenci světla a proto se jednotlivé složky lámou pod různými úhly. Nejvíce se lámou složky s největší frekvencí (fialová) a nejméně zalomené budou složky s nízkou frekvencí (červená).

Pokud světlo přechází do jiného optického prostředí tak na rozhraní obou prostředí, se nemění frekvence, ale změní rychlost světla a tím se změní i vlnová délka.

Matematické vyjádření disperze světla je:

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda}$$
$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 * f}{\lambda * f} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Pro rozklad světla můžeme použít optický hranol. Rozklad světla můžeme také pozorovat v přírodě, kde se světlo rozkládá v dešťových kapkách a vzniká tak duha.



Obrázek 1.3: rozklad světla na hranolu

1.6 Optická vlákna

Jsou velmi tenká vlákna, k jejichž výrobě bylo použito sklo nebo plast. Skleněná optická vlákna se vyrábí z křemenných, boritokřemičitých a sodnovápenatých skel. Pro výrobu plastových optických vláken se používají polymetymetakryláty nebo také polymetylsiloxany. Samotná výroba optického vlákna může probíhat jednou ze tří metod:

1) Pokud potřebujeme vytvořit vlákno libovolné délky, použijeme metodu dvojího kelímku. Tato metoda je založena na dvou koncentrických kelímcích. V jednom kelímku je roztavený materiál, jenž tvoří jádro a v druhém kelímku taktéž roztavený materiál pláště.

2) Metoda tyčka v trubce - do trubky z materiálu pláště zasouváme natavenou tyčku jádra.

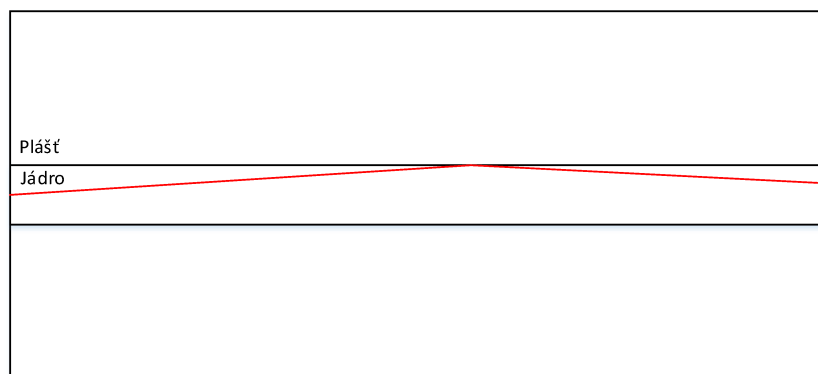
3) Výroba vláken z preformy. Při této metodě se používá na vstupu válec materiálu, ze kterého bude optické vlákno vyrobeno. Tento materiál obsahuje jak materiál jádra, tak i materiál pláště. Při vysokofrekvenčním ohřátí trubky za současného přívodu plynů, které se v plazmě budou rozkládat, vznikne nejprve vrstva pláště a poté se utvoří jádro. Slouží k přenosu světla nebo informací pomocí světelného paprsku. Pomocí optických vláken můžeme přenášet, velké množství informací na velké vzdálenosti. Je to dáno tím, že optická vlákna jsou velmi spolehlivá a odolná vůči vnějšímu rušení. Nevýhodou optických vláken je velká náchylnost na ohyb. Pokud je příliš ohneme, můžeme porušit podmínku totálního odrazu, čímž se světelný paprsek z vlákna vyváže nebo můžeme vlákno rovnou zlomit. Optická vlákna lze také použít pro přenos světla. Toho se využívá hlavně v těsných a nepřístupných prostorách. Díky tomu, že vedou pouze světlo, jsou vhodné na aplikaci ve specifických prostředích, kde bychom nemohli použít klasického metalického vedení.

Optická vlákna se dělí na vícevidové a jednovidové. Vícevidové pro přenos informace používají více světelných paprsků najednou. Vícevidové optické vlákna mohou být, buď gradientní což znamená, že změna indexu lomu je postupná a světelný paprsek se v optickém vláknu plynule ohýbá místo toho aby se lámal jako se tomu děje u vláken se skokovou změnou indexu lomu. Vícevidová vlákna mají oproti jednodovým vláknům větší průměr a to 50/125 μm . Jednovidová vlákna mají průměr pouze 5-10/125 μm (většinou se používá 9/125 μm). Pro přenos dat při smysluplné rychlosti se jednovidová vlákna se používají na vzdálenost desítek kilometrů a vícevidová vlákna do dvou kilometrů.

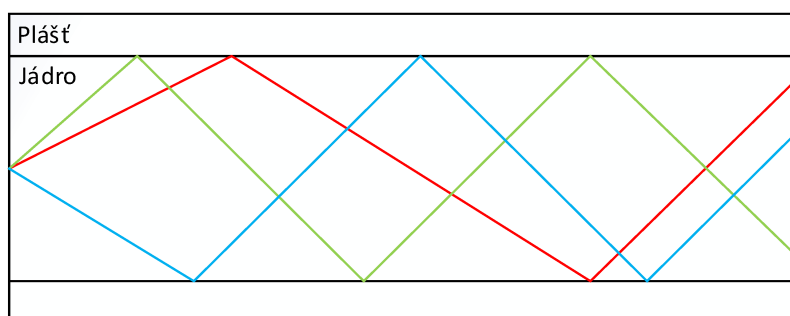
U vícevidových vláken je také dosah omezen módovou disperzí, kdy různé paprsky dorazí do cíle v různý čas i když byly vyslány ve stejný okamžik. Je to způsobeno tím, že každá vlnová délka vlnová délka má jiný úhel lomu.

Důležité parametry optických vláken jsou šířka pásma (MHz), numerická apertura (NA), disperze, útlum (dB), minimální poloměr ohybu, obsah OH (ionty vody).

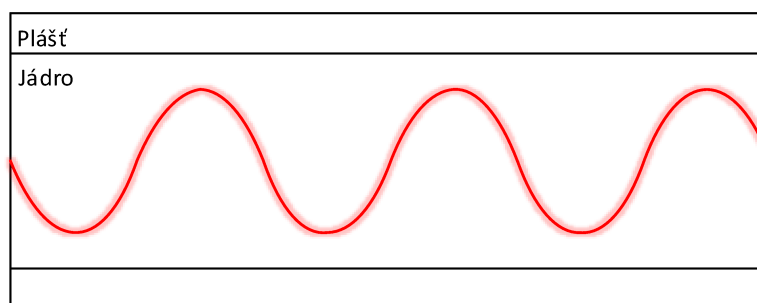
Nejkratší vlnová délka, při které se vlákno projevuje jako jednovidové, je mezní vlnová délka λ_C . V závislosti na vlnové délce přenášeného paprsku se může jednovidové vlákno stát vícevidovým vláknem. Tato změna se děje postupně se změnou vlnové délky. Běžně se jednovidovým vláknem vysílá paprsek, který má vlnovou délku větší než je mezní vlnová délka λ_C .



Obrázek 1.4: *Jednovídné optické vlákno*



Obrázek 1.5: *Vícevídné optické vlákno*



Obrázek 1.6: *Gradientní optické vlákno*

1.6.1 Šířka pásma optického vlákna

Uvádí se v MHz/km. Je to tedy nejvyšší možná frekvence signálu, jenž lze přenést na vzdálenost jednoho kilometru spolehlivě bez přílišného zkreslení signálu díky disperzi. Například pokud přenášíme více módů v jednom vláknu.

Šířku pásma ovlivňuje vlnová délka optického signálu, materiál použitý při výrobě optického vlákna a taky na samotné konstrukci optického vlákna.

Největší vliv na šířku pásma má vlnová délka. I útlum vlákna je závislý na vlnové délce přenášeného signálu.

1.6.2 Numerická apertura - NA

Je to důležitý údaj pro navázání světelného paprsku do optického vlákna. Udává totiž jaký je největší možný úhel pro navázání světelného paprsku do optického vlákna takovým způsobem, že světelný paprsek je přenášen pouze v jádru optického vlákna.

Numerická apertura je výsledkem sinu maximálního úhlu φ_a , což je úhel, pod kterým paprsek, který vstoupí do optického vlákna, se šíří od začátku až do konce. Pokud by paprsek dopadl na optické vlákno pod větším úhlem než je maximální úhel tak se optickým vláknem šířit nebude.

Je to charakteristika optického vlákna, která nám říká, jaký optický výkon lze navázat z okolního prostředí do optického vlákna. Pokud bude tato schopnost navázat optický signál větší, tak dokáže přenést více výkonu.

Světelný paprsek se optickým vláknem šíří pouze pokud je možný úplný odraz paprsku na rozhraní jádra a pláště. Pokud světelný paprsek překročí mezní velikost úhlu, vztaženého k ose vlákna, tak na rozhraní jádra a pláště dojde k lomu paprsku. Takže se paprsek neodrazí, ale projde do pláště nebo se vyváže z vlákna ven.

Vzoreček pro výpočet numerické apertury:

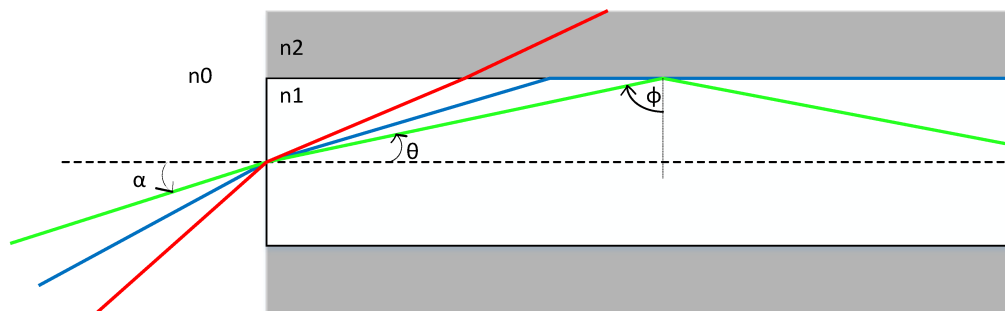
$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

n_1 označuje index lomu jádra

n_2 označuje index lomu pláště

Optická vlákna mají plášť a jádro. Jádro je vnitřní válec, kolem kterého je plášť. Plášť musí mít index lomu n_2 menší než je index lomu jádra n_1 . Při zachování této podmínky lze vlákno použít jak optický vlnovod.

Představme si tři paprsky, každý se bude navazovat pod jiným úhlem. Jeden, který splní Snellův zákon úplného odrazu. A další dva, které se navážou s úhlem, který je takový, že se Snellův zákon totálního odrazu nesplní. První paprsek se tedy naváže a díky odrazu bude pokračovat vláknem dál. U druhého předpokládejme úhel takový, že paprsek se z jádra vyváže a pronikne do pláště. U třetího předpokládejme, že se naváže pod takzvaným kritickým úhlem. Je to takový úhel, že ve chvíli kdy by se měl paprsek odrazit a pokračovat v jádru, se neodrazí a pokračuje v rozhraní jádra a pláště.



Obrázek 1.7: Navázání paprsku do pláště

Z tohoto by se dalo vyvodit, že pokud je numerická apertura NA větší, tím větší je účinnost navázání světelného paprsku do optického vlákna a jsou i nižší nároky na úhel, pod kterým je světelný paprsek navázán. Ale, pokud je úhel pod kterým navážeme světelný paprsek příliš velký, bude docházet k větším rozsahům ve vzdálenosti kterou musí světelné paprsky urazit ke konci optického vlákna. Tímto se také může přenášený signál zkreslit. Takže pokud použijeme optické vlákno s vysokou numerickou aperturou NA, snížíme tím šířku frekvenčního pásma.

Při navazování světelného paprsku ze zdroje do optického vlákna vznikají ztráty. Tyto ztráty budou také záviset na vzájemné poloze zdroje a optického vlákna.

Další ztráty, které mohou vzniknout, jsou ztráty z důvodu různého průřezu vyzařovací plochy zdroje a průřezu jádra. Pokud budou tyto průřezy velmi odlišné, budou velké i ztráty.

Ztráty vzniklé různými průřezy zdroje světla a jádra optického vlákna můžeme spočítat pomocí vzorečku:

$$K = 10 * \log \left(\frac{A_C}{A_S} \right) [dB]$$

AC označuje průřez jádra optického vlákna

AS označuje plochu světelného paprsku vyzařovaného zdrojem na konec optického vlákna

1.6.3 Disperze

Jedna z příčin, která způsobuje zkreslení přenášeného signálu je disperze.

Rozeznáváme několik druhů disperzí. Vidové disperze jsou způsobené rozdílnou délkou jednotlivých módů ve vícevidovém optickém vlákně. Další disperzí, kterou rozeznáváme je chromatická disperze. Je způsobena pokud používáme různé frekvence na jednotlivé módy ve vícevidovém optickém vlákně. Různé frekvence způsobí, že každý paprsek se bude jinak odrážet a na konec optického vlákna dorazí v různém čase. Další disperzí, jenž se u optických vláken projevuje je

polarizační vidová disperze. Tato disperze se projevuje v jednovidových vláknech. Je to z důvodu, že paprsek se v jednovidovém vlákně šíří ve dvou navzájem kolmých polarizačních rovinách. A pokud paprsek narazí na nějakou vadu v optickém vlákně nebo bude vlákno příliš ohnuté bude se každá polarizační rovina šířit jinou rychlostí.

1.6.4 Vidová disperze

Při použití vícevidových vláken se projeví vidová disperze. Díky různým délkám drah dorazí každý paprsek na konec optického vlákna v různý okamžik. To způsobí i odlišný tvar impulsu a amplitudy na konci optického vlákna.

Tato disperze se projevuje hlavně u dlouhých vláken, pokud přenášíme data. Toto způsobuje omezení na počet impulsů, které můžeme odeslat v určitém časovém úseku. Pokud budeme přenášet data na vzdálenosti delší než jeden kilometr, bude docházet rozdílu v délce drah jednotlivých paprsků a tím i různé době než se dostanou na konec optického vlákna. Tímto se změní i výstupní impuls, hlavně tedy jeho tvar. Tento tvar se může zkreslit až takovým způsobem, že dojde ke zkreslení a nedokážeme zjistit, jaká byla původní informace. Pokud bychom vyslali na takto dlouhém vlákně několik obdélníkových impulsů, dostali bychom na konci stejný počet impulsů, ale tyto impulsy budou mít menší amplitudu, budou širší a budou se také překrývat.

Toto způsobuje omezení na vzdálenost, na kterou lze data bezpečně přenést nebo na šířku pásma a tím i na přenosovou rychlost. Pokud mají mít impulsy, na konci vlákna, tvar který lze detekovat musíme použít pouze určité kmitočty.

Vidovou disperzi můžeme omezit použitím jiných vláken. U gradientních vláken lze vidovou disperzi částečně potlačit. Pokud použijeme jednovidové vlákno, nemůže vidová disperze ani vzniknout, protože vysíláme pouze jeden paprsek.

1.6.5 Chromatická disperze

Jelikož v reálném světě je téměř nemožné, aby něco bylo ideální, nejsou ani monochromatické zdroje světla ideální a kromě námi požadované vlnové délky vyzařují i spektrum vlnových délek kolem naší požadované vlnové délky. Protože index lomu závisí na vlnové délce, tak se jednotlivé vlnové délky daného spektra budou šířit různou rychlostí. Proto na konec optického vlákna dorazí každá vlnová délka daného spektra v různém čase. Na konci optického vlákna se poskládají časově posunuté a budou mít jiný časový průběh než na začátku.

To ovlivňuje nepříznivě šířku kmitočtového pásma a nutí nás omezit maximální vzdálenost, na kterou můžeme přenášet data.

U běžně používaných jednovidových optických vláknech používáme vlnovou délku 1310 nm, protože se zde chromatická disperze projevuje minimálně nebo vůbec.

1.6.6 Polarizační vidová disperze

Pokud používáme jednovidové vlákna, tak nás tato disperze bude zajímat. Paprsek se totiž šíří jednovidovým optickým vláknem ve dvou polarizačních rovinách, které jsou navzájem kolmé. Takže pokud bude optické vlákno jakkoliv nesymetrické buď už z výroby, přílišným stlačením nebo nadměrným ohybem budou se polarizační roviny šířit různou rychlostí. Tím může dojít k tomu, že impuls bude zkreslený. Pokud budeme přenášet data rychleji než 2,5Gb/s tak se tato disperze začne stávat důležitou a nelze jí přehlížet. I přesto se polarizační disperze projevuje mnohem méně než ostatní druhy disperzí.

1.6.7 Útlum světelného paprsku v optickém vlákně

V optickém vlákně také klesá přenášený výkon se vzrůstající vzdáleností, podobně jako tomu je u běžných metalických vedení. U optického vlákna udáváme útlum v jednotkách dB/km. Toto je vlastně měřítko udávající ztráty ve vedení světelného paprsku v optickém vlákně. Je to poměr vstupního výkonu P_1 a výstupního výkonu P_2 a tento poměr se vztahuje k vlnové délce.

Toto můžeme vypočítat pomocí vzorečku:

$$u(\lambda) = 10 * \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) [dB]$$

V optickém vlákně jsou hlavními důvody útlumu optického signálu absorpce a rozptyl paprsků světelného signálu. Ztráty mohou vzniknout přímo v materiálu daného optického vlákna, na rozhraní prostředí vlákna, ve spojích optických vláken nebo také na různých ohybech (mikroohyby, makroohyby) optického vlákna.

Pokud chceme zjistit celkový útlum optického vlákna je nutno sečíst všechny složky způsobující útlum.

Měrný útlum spočítáme pomocí vzorce:

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_R + \alpha_N + \alpha_{MO} + \alpha_O$$

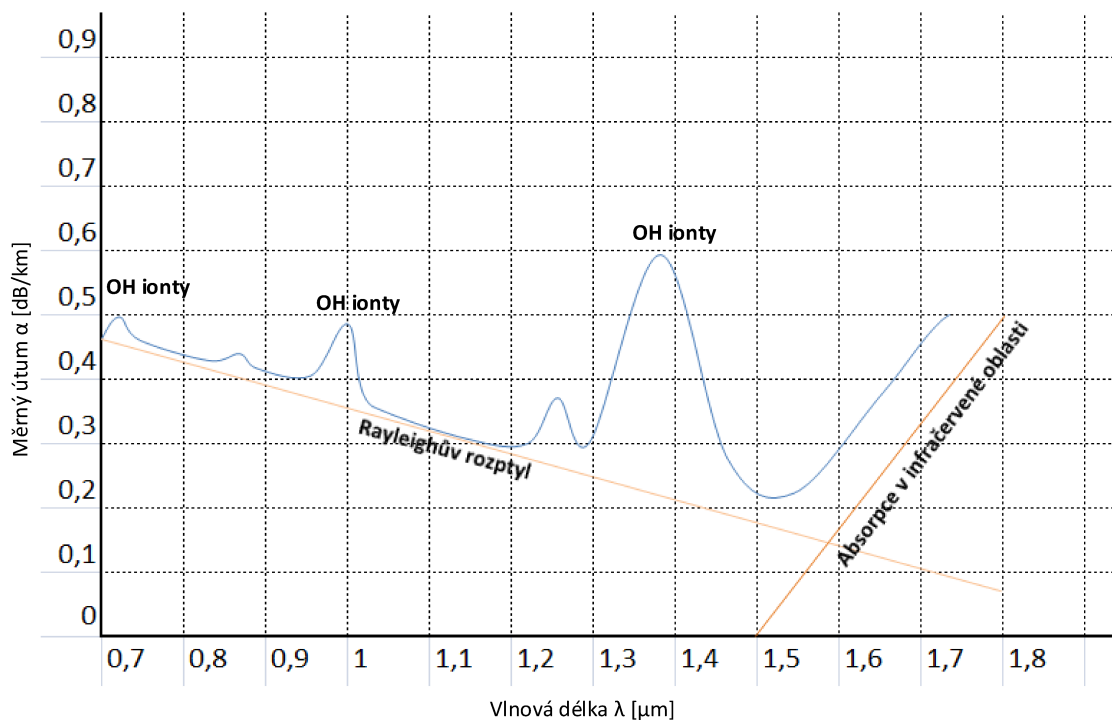
α_A - útlum způsobený absorpcí

α_R - Rayleighův rozptyl

α_N - rozptyl vzniklý z důvodu makroskopických neregularit

α_{MO} - rozptyl vzniklý na mikroohybech

α_O - rozptyl vzniklý na makroohybech



Obrázek 1.8: Útlum paprsku ve vlákne v závislosti na vlnové délce

1.6.8 Útlum vzniklý absorpcí

V jádru vlákna se paprsek částečně narušuje rozptylem v materiálu a také nevlastní absorpcí a tím dochází ke ztrátám. Tyto ztráty jsou závislé na vlnové délce.

K vlastní absorpci dochází z důvodu, že molekuly materiálu ze kterého je optické vlákno absorbují část světelného paprsku. Běžně používaný materiál je křemen a ten velice výrazně absorbuje infračervené ale i ultrafialové spektrum.

Pokud jsou v optickém vlákne nějaké nečistoty, dochází k nevlastní absorpci. Tyto nečistoty se do optického vlákna dostávají při výrobě optického vlákna. Při výrobě nebo pokud je optické vlákno špatně chráněno proti přírodním vlivům mohou do něj vniknout ionty kovů (Cr, Cu, Fe) a vody. Pokud používáme hodně kvalitní optické vlákna, bude koncentrace iontů kovů nižší než 10^{-9} a pro ionty vody 10^{-7} . Ještě při výrobě optického vlákna mohou zůstat OH ionty, které při použití některých vlnových délek mohou způsobit problém s absorbováním světelného paprsku.

1.6.9 Rayleighův rozptyl

Je to rozptyl v optickém vlákne kdy části světelného paprsku dopadají na molekuly materiálu ze kterého je optické vlákno vyrobeno a různě se odráží a lámou. Tyto paprsky, které se příliš odkloní, mohou proniknout do pláště a zaniknout.

Rozptyl je způsobený tím, že materiály používané pro výrobu optických vláken nejsou krystalické ale amorfni. To znamená, že molekuly jsou v materiálu rozmístěny náhodně. To způsobuje různé malé nehomogenity v indexu lomu. Pokud jsou tyto nehomogenity a případné nečistoty malé v poměru s vlnovou délkou, kterou pro přenos používáme, tak tyto ztráty můžeme nazvat Rayleighovy. Tyto ztráty nemůžeme odstranit a ani jim jinak zabránit. U těchto ztrát je rozptyl do všech směrů a tím se část výkonu ztratí.

1.6.10 Ohyb vlákna

Pokud vlákno ohýbáme tak uvnitř jádra optického vlákna dochází ke změně úhlu pod, kterými paprsek dopadá na rozhraní jádra a pláště a tím se mění i úhel odrazu případně se paprsek může z jádra vyvázat a ztratit se v plášti. To způsobí, že na konec optického vlákna se dostane menší počet paprsků, než kolik jsme jich vyslali na začátku optického vlákna. Tomuto se snažíme v praxi vyhnout. Ale lze to také využít při konstrukci některých senzorů. Pokud se chceme vyhnout ztrátám, musíme vlákno ohýbat co nejméně (co největší poloměr). U každého optického vlákna výrobce udává, jak moc jej lze ohnout.

Nejmenší poloměr, který můžeme s optickým vláknem dosáhnout, se nazývá minimální poloměr ohybu. Pokud použijeme optické vlákno vyrobené ze skla, bude tento poloměr ohybu větší než pokud bychom použili optické vlákno vyrobené z plastu. Tento minimální poloměr je také závislý na průměru optického vlákna. Pokud bude průměr optického vlákna větší tak bude větší i minimální poloměr ohybu.

1.6.10.1 *Vliv ohybu na útlum v optickém vlákne*

Pokud vlákno ohýbáme tak s klesajícím poloměrem roste útlum optického vlákna. Pokud je vlákno ohnuté je náchylnější na poškození v daném místě.

Ohyby rozdělujeme na makroohyby a mikroohyby.

1.6.10.2 *Makroohyby*

Tyto ohyby jsou při běžné práci s optickými vlákny zcela normální. Musíme na ně pamatovat při konstrukci rozvaděčů a spojů. Velikost útlumu je závislá na velikosti ohybu daného vlákna.

Pokud používáme jednovidové optické vlákna, tak také musíme pamatovat na rozdíly indexu lomu v optickém vlákně. Pokud použijeme optické vlákno s větším průměrem, bude optické vlákno náchylnější na ohyby a bude se útlum projevovat výrazněji. Pokud světelný paprsek dopadne na rozhraní jádra a pláště pod příliš velkým úhlem, tak se paprsek vyváže z jádra a pronikne do pláště, kde se ztratí.

1.6.10.3 **Mikroohyby**

Tyto ohyby vznikají při výrobě nebo působením okolních sil (například pokud vlákno příliš stlačíme). Na těchto ohybech se některé vidy různě odráží nebo pronikají do pláště a tím zaniknou. To způsobuje, že část vyslaného signálu se ztratí a vznikne útlum.

Pokud by mikroohyb měl poloměr křivosti takový, že by byl srovnatelný s vlnovou délkou světelného paprsku, který používáme tak to považujeme za poruchu přímočarosti osy světlovodu. Tyto poruchy vznikají už v továrně při výrobě optického vlákna nebo působením různých sil na optické vlákno. Tyto mikroohyby mohou být velké kolem jednoho milimetru. A opakují se zhruba každých několik milimetrů až několik desítek milimetrů. Protože se s mikroohyby setkáme po celé délce optického vlákna, tak se mohou velmi výrazně projevit v útlumu. Výskyt těchto mikroohybů je čistě náhodný.

1.6.11 **Ztráty na makroskopických neregularitách**

Tyto neregularity jsou hlavně různé nečistoty, bublinky vzduchu, trhlinky a jinak narušený tvar a rozměry hranice mezi jádrem optického vlákna a jeho pláštěm. Tyto ztráty lze omezit zlepšením technologie výroby optického vlákna. Tyto ztráty jsou zahrnuty ve ztrátách vlákna, které jsou udávány výrobcem. Pokud dojde k narušení geometrie optického vlákna, dojde k dalším ztrátám, které musíme přidat.

1.6.12 **Odraz paprsků**

1.6.12.1 **Fresnelův odraz**

Tento odraz vzniká při navazování světelného paprsku do optického vlákna. Je to způsobeno odrazem paprsku na vstupu a výstupu z optického vlákna. Část paprsku se totiž odráží a putuje zpět ke zdroji.

1.6.12.2 **Difúzní odraz**

S tímto odrazem se setkáme v optickém vlákně. Jsou to odrazy způsobené vadami materiálu a mikroskopickými nerovnostmi v místech kde se má paprsek odrážet nebo lámat. Tento odraz způsobuje útlum v závislosti na tom kolik je vad v optickém vlákně.

1.6.13 Vazební ztráty na spojích optického vlákna

Tyto ztráty můžeme omezit těsným a opticky upraveným kontaktem optických vláken. Důležitá je také sousost.

Pokud budeme spojovat optické vlákna tak nejčastějším problémem je ztráta na konektorech.

Čelo vlákna musí být správně nastaveno vůči čelu druhého vlákna, do kterého má přecházet světelný paprsek. Zde mohou vzniknout různé odchylky, které se mohou navzájem kombinovat.

1.6.14 Radiální odchylka

Je způsobena radiálním posuvem optických vláken a tvoří největší podíl na celkových ztrátách. Může být způsobená už při výrobě, pokud jsou nastavené nějaké tolerance v průměru optického vlákna, excentricitou jádra k ose optického vlákna. Nebo může být také způsobena tolerancí při výrobě konektoru. Díky nedokonalým spojmům můžou vzniknout ztráty sousostí. Je to způsobeno tím, že osy vláken jsou navzájem posunuty. Díky tomuto požadujeme vysokou přesnost při spojování optických vláken, hlavně pokud používáme malý průměr jádra.

1.6.15 Axiální posuv

Je to způsobeno, pokud je první optické vlákno příliš vzdáleno od druhého optického vlákna. Proto část paprsků dopadne do pláště optického vlákna, místo do jádra.

V praxi s tímto musíme počítat z bezpečnostních důvodů, protože vlákna mezi sebou musí mít odstup, aby nedošlo k jejich poškození při nárazu jednoho optického vlákna do druhého. Tyto ztráty jsou závislé na numerické apertuře obou vláken. Pokud bude rozdíl numerické apertury příliš velký tak výkon, který budeme schopni navázat, bude malý.

1.6.16 Úhlový posuv

Tento posuv tolik neovlivní ztráty v porovnání s radiální odchylkou a axiálním posuvem. Je to způsobeno tím, že optická vlákna nejsou tak citlivá na tuto odchylku.

Ztráty při rozdílném průřezu spojovaných vláken

Pokud budeme spojovat vlákna, která mají rozdílnou velikost jádra tak je velká šance, že se část paprsku z prvního vlákna nenaváže do jádra druhého vlákna, ale do jeho pláště kde se ztratí.

1.6.17 Obsah OH iontů

OH ionty jsou ionty vody, které se do optického vlákna dostávají při jeho výrobě. Tyto ionty ovlivňují přenos některých vlnových délek. Díky tomu máme na výběr, kromě vláken kde je obsah OH iontů malý i vlákna kde je obsah OH iontů velký.

Dělí se na několik kategorií: Ultra low, low, high, ultra high.

Pokud potřebujeme pracovat s infračerveným spektrem, použijeme vlákna, která mají málo OH iontů.

1.6.18 Parametr MFD (Mode FieldDiameter)

Pro jednovidová vlákna se tento parametr uvádí místo jejich průměru. Světelný paprsek se v jednovidových optických vláknech šíří v jádru, stejně jako v ostatních vláknech, ale částečně i v plášti.

Parametr MFD je konstantí a říká nám jaká je šířka, kde intenzita světelného paprsku, který přenášíme, je alespoň 0,135 z maximální intenzity. Musíme pamatovat, že MFD ovlivňuje, jakou můžeme použít vlnovou délku. Pokud budeme používat kratší vlnovou délku, můžeme použít i menší MFD. S tímto parametrem musíme také počítat při spojování vláken. Vlákna, která spojujeme, mohou mít sice stejný průměr jádra a pláště, ale rozdílný MFD.

1.7 Interference

Je to skládání vlnění. Tedy, že jedno vlnění ovlivňuje jiné. Pokud se jedná o interferenci světla, projeví se světlo jako vlnění.

Pokud by se jednalo o mechanické vlnění tak sečteme okamžité výchylky.

U elektromagnetického vlnění taktéž sečteme okamžité výchylky jak elektrické složky, tak magnetické složky.

Pro vznik interference jsou zapotřebí mít dva a více zdrojů vlnění.

Pokud budou mít stejnou frekvenci signál se nezmění nanejvýš zesílí, pokud bude frekvence odlišná, signály se smíchají a výsledný signál bude součtem jednotlivých složek v každém okamžiku.

1.7.1 Koherence záření

Je to záření, které má stále stejnou vlnovou délku a rozdíl fází jednotlivých paprsků se nemění. Pro lepší koherenční vlastnosti můžeme zvýšit monochromaticnost (vysílání pouze jedné frekvence a ne úzkého spektra) a také pomůže ohraničení velikosti zářící plochy zdroje. Pokud ohraničíme velikost zářící plochy zdroje tak zlepšíme prostorovou koherenci. Kdybychom zlepšili monochromaticnost tak se to pozitivně projeví na časové koherenci.

1.7.2 Časová koherence

Ideální zdroj koherentního záření vysílá v každém okamžiku a celou plochou svého povrchu monochromatické záření. Pokud zdroj není ideální, bude vyzařovat určité úzké spektrum kolem námi požadované frekvence. Tyto okolní frekvence, které jsou obsaženy ve spektru budou tvořit zázněje. Takže signál bude kolísavý. Délku záznějů můžeme vypočítat pomocí vzorce:

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta f}$$

L - délka zázněje

λ - vlnová délka

$\Delta\lambda$ - spektrum okolních vlnových délek

c - rychlost světla

Δf - spektrum okolních frekvencí

Pokud chceme použít koherentní zdroj světla, musíme myslet na to, že dobrou interferenci můžeme dostat pouze pokud použijeme superpozici paprsků, které jsou velmi podobné a rozdíl těchto paprsků bude menší než koherenční délka L .

1.7.3 Prostorová koherence

Čím menší je tato koherence, tím více se světlo šíří do stran. Tuto koherenci vyjadřujeme pomocí koherenční šířky. Vzdálenost mezi osou hlavního svazku paprsků a místem kde už je minimum intenzity se označuje R a tuto vzdálenost nazýváme koherenční šířkou.

Koherenční šířku můžeme vyjádřit pomocí vzorečku

$$R = a \frac{\lambda}{2 * 2r}$$

a - vzdálenost zdroje od stínítka

$2r$ - velikost zdroje záření

λ - vlnová délka

1.8 Interferometrie

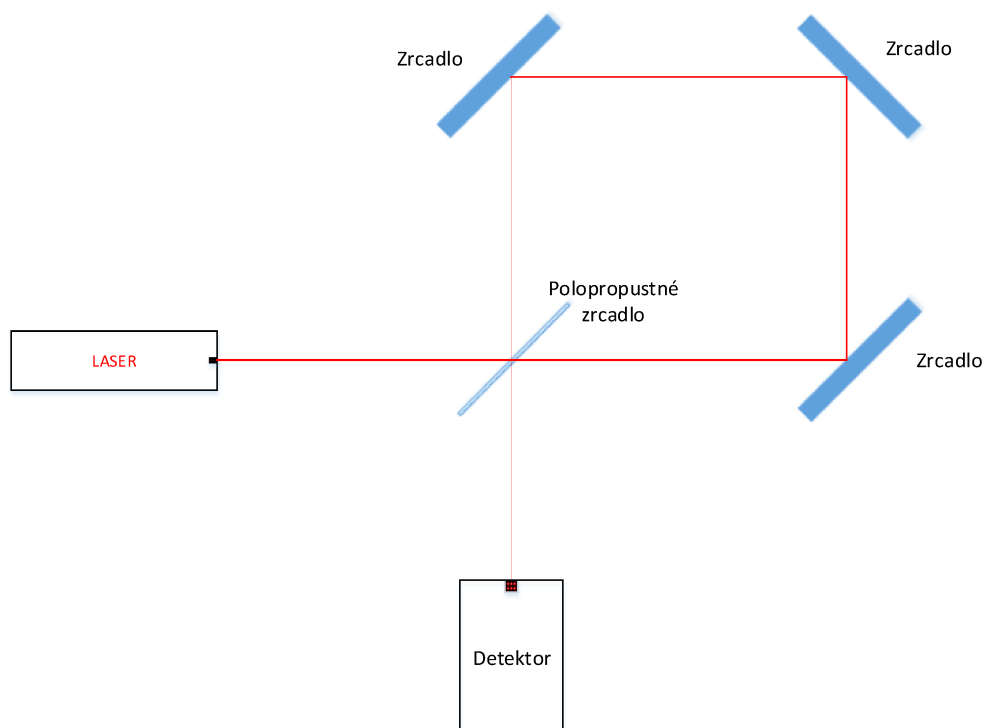
Optickými analytickými metodami založenými na interferenci světla jsou refraktometrie a interferometrie. U refraktometrie se měří přímo index lomu. U interferometrie se měří rozdíl indexu lomu mezi známým prostředím, které je definováno indexem lomu a neznámým prostředím. Při tom se využívá ohybu a interference světla na štěrbině. Z rozdílů indexů lomu je možno určit analytickou koncentraci měřené látky, vzorku.

1.8.1 Interferometry

Interferometry jsou velmi přesné měřicí přístroje, jejichž princip je založen na interferenci světla. Protože se v interferometrech používají velmi krátké vlnové délky (přibližně stovky nanometrů), můžeme rozlišit i velmi malé změny v měřené veličině. Měřit můžeme délku, index lomu a spoustu dalších veličin, které neměříme přímo, ale projeví se nějakou změnou (interferencí) na světelném paprsku, který poté můžeme vyhodnotit. Pomocí interferometrů se dnes měří vzdálenosti, teplota a tlak plynů nebo také plazmatu. Můžeme pomocí interferometrů také studovat různé povrchy nebo měřit index lomu kapalin nebo také plynů.

1.8.2 Nejpoužívanější typy interferometrických přístrojů

1.8.2.1 Sagnacův interferometr

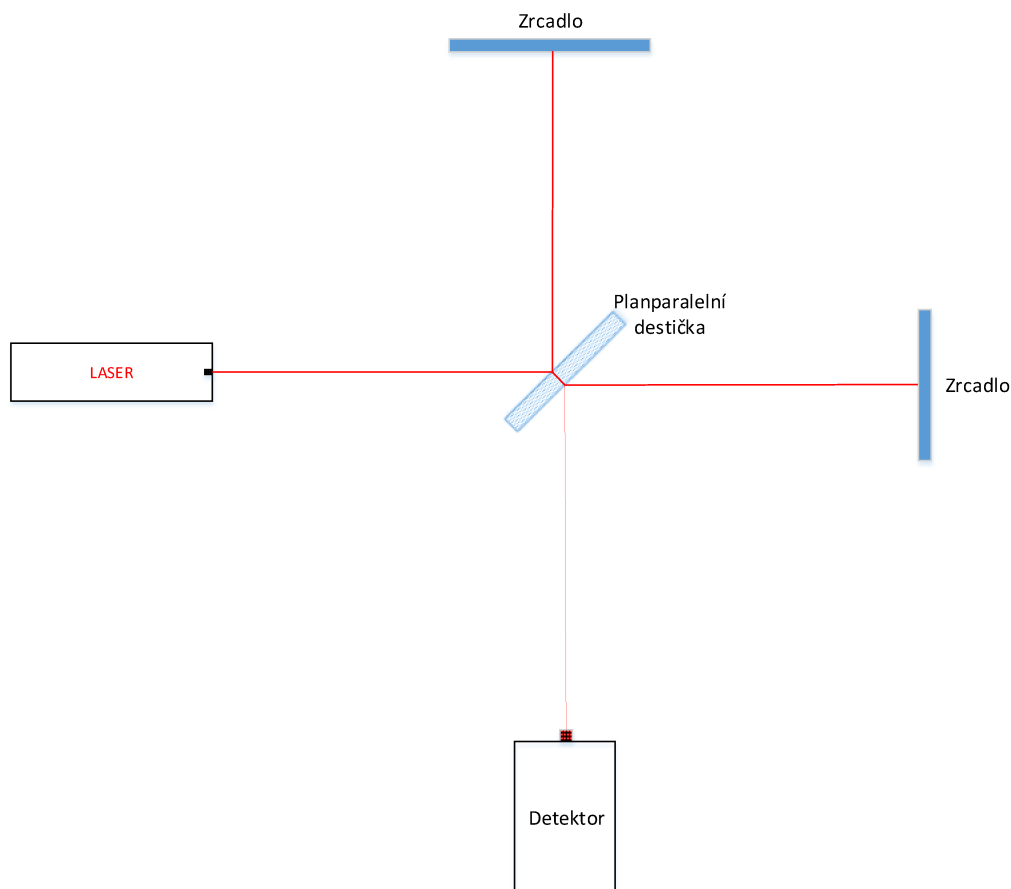


Obrázek 1.9: Sagnacův interferometr

Sagnacův interferometr můžeme vidět v laserových interferenčních gyroskopech.

Tento interferometr byl vynalezen v roce 1913 francouzským fyzikem, jenž se jmenoval Georges Sagnac. První částí tohoto interferometru je světelný zdroj, který vyzařuje monochromatické světelné paprsky. Tyto paprsky poté putují na polopropustnou destičku, která tyto paprsky rozdělí na dvě části. První část paprsku se přes tuto destičku dostane a pokračuje na soustavu zrcadel, která tento paprsek odráží proti směru hodinových ručiček. Druhá část původního paprsku se od polopropustné destičky odrazí a soustavou zrcadel prochází po směru hodinových ručiček. Protože paprsky prochází přes stejnou soustavu zrcadel, jen s rozdílem směru, bude tato dráha pro oba paprsky stejně dlouhá. Protože je tedy pro oba paprsky stejně dlouhá dráha budou oba paprsky spolu interferovat ve stejné fázi. Pokud budeme interferometrem otáčet ve směru hodinových ručiček, pak paprsek, který půjde soustavou zrcadel v protisměru hodinových ručiček, urazí kratší cestu než paprsek, který putuje ve směru hodinových ručiček. Tím dojde k tomu, že paprsky budou mezi sebou interferovat s odlišnou fází. Toto platí i pro změnu směru otáčení. Takže pokud bychom otáčeli proti směru hodinových ručiček, paprsek, který půjde ve směru hodinových ručiček, bude mít cestu kratší než paprsek, který půjde proti směru hodinových ručiček.

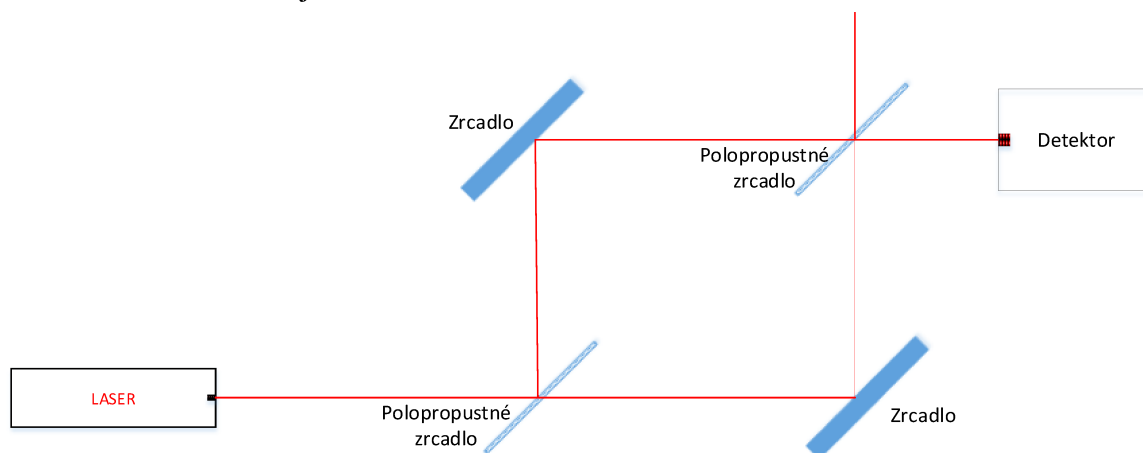
1.8.2.2 Michelsonův interferometr



Obrázek 1.10: Michelsonův interferometr

Používá se pro měření kvality zrcadel nebo jiných ploch, které lámou nebo odrážejí světlo. Tento interferometr byl poprvé sestaven v roce 1887. Tvůrcem tohoto interferometru byl Albert Abraham Michelson. Využívá se zde skládání, jinak také interference, světelného vlnění. Původní tvůrce Michelson použil k pokusu rtuťovou výbojku, ale dnes se již používají lasery. Paprsky z laseru dopadají na tenkou skleněnou destičku, která má obě strany rovnoběžné a je natočena pod úhlem 45° . Této destičce se říká planparalelní. Na této destičce se paprsek zároveň odráží a láme. To způsobí, že se paprsek rozdělí na dvě části. Lomené paprsky se poté odrazí od zrcadla a vrací se na destičku, kde se lomily. Na této destičce se odrazí a putují dále do detektoru. Podobně tomu je u odražených paprsků. Tyto paprsky se rovněž odrazí od zrcadla a vrací se na destičku, kde se odrazily. Tentokrát se, ale na destičce zlomí a projdou dále na detektor. Pokud bude zrcadlo, na které dopadá lomený paprsek, v jiné vzdálenosti než zrcadlo, na které dopadá paprsek, který je odražen, bude na detektoru zaznamenáno interferenční maximum nebo minimum.

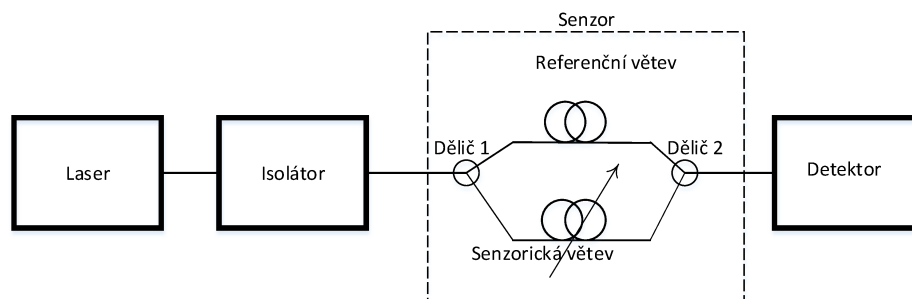
1.8.2.3 Mach-Zehnderův interferometr



Obrázek 1.11: Mach-Zehnderův interferometr

Za vznik tohoto interferometru vdčíme Ernstu a jeho synovi Ludwigu Machovi, kteří tento interferometr postavili v roce 1891. Nezávisle na této dvojici stejný interferometr sestrojil i Ludwig Zehnder. Zdroj světelných paprsků musí být monochromatický. Tyto paprsky dopadnou na destičku, která je polopropustná a původní světelný paprsek rozdělí na dva paprsky. Jeden paprsek je referenční a druhý je měřicí, někdy též předmětový. Pokud potřebujeme měřicí paprsek rozšířit, můžeme paprsek pomocí čoček upravit tak abychom dosáhli většího průměru. Podobně jako jsme rozšířili měřicí paprsek, můžeme rozšířit i referenční paprsek. Měřicí paprsek poté prochází transparentním předmětem. Tím dojde k deformaci paprsku. Poté co měřicí paprsek projde prostorem, který měříme, se opět setká s referenčním paprskem. Oba paprsky se setkávají na polopropustném zrcadle. Poté se rozdělí na dvě větve a putují dále na detektory. Nebo se sloučí a měříme jaký je rozdíl mezi referenčním a měřicím okruhem. Díky tomu, že máme dva okruhy (referenční a měřicí), je tento interferometr vhodný pro měření, kde potřebujeme něco srovnávat. Proto se tento interferometr používá například v aerodynamických tunelech. V těchto tunelech porovnáváme tvar obrazců, které vznikají díky různým tlakům a indexům lomu. Pro použití tohoto interferometru je nutné použít vysoce kvalitní polopropustné destičky, zrcadla i čočky.

1.8.2.4 Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr



Obrázek 1.12: Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr

V praxi se nejčastěji setkáme s Mach-Zehnderovým interferometrem. Jako zdroj světla je laser. Použitá optická vlákna jsou singlemódová. Paprsky po průchodu vlákny snímá fotodetektor a zaznamená signál vzniklý následkem interference z referenčního a sensorového vedení. Působení měřené veličiny na sensorické vedení způsobuje změnu fáze signálu. Problémem sensorů snímajících změnu fáze optického signálu je jejich složitá konstrukce, vyžadující použití singlemódových optických vláken. Dalším problémem může být vliv i jiných veličin než potřebujeme měřit.

2 Praktická část

2.1 Vlastní konstrukce senzoru s M-Z interferometrem

Pro vlastní funkci vláknově optického Mach-Zehnderova interferometru použijeme optická vlákna s děličem. Pro samotné měření potřebujeme, aby jedna větev, která vychází z děliče, byla referenční. To zajistíme tak, že jí budeme chránit před námi měřenou veličinou. Do mého přístroje jsem zvolil dvě polystyrenové desky o tloušťce pět centimetrů. Do jedné z nich jsem vypálil prostor pro uložení děličů a optického vlákna. Druhou deskou jsem tuto vnitřní konstrukci zakryl. Senzorickou větev jsem vyvedl z polystyrenových desek na pevný podklad, kde jsem jí přilepil páskou. Tento podklad byl nejprve ze skla o tloušťce osm milimetrů, později jsem jej nahradil plastovou stěnou bedny, ve které bylo celé zařízení uloženo. Tato plastová bedna se ukázala jako nejlepší ochrana před vlivy vnějšího prostředí. Vstup a výstup optických vláken jsem vyřešil otvory ve stěně bedny. Abych zajistil potřebnou ochranu před případným pronikáním vlhkosti či nečistot použil jsem plastové průchodky s gumovým těsněním, které lze podle potřeby dotahovat. Z důvodu nízké citlivosti jsem vyzkoušel různé sady kabelů a děličů.

2.1.1 Použité přístroje pro měření:

Jako zdroj světla používám laser DFB (Distributed feedback - laser se zpětnou vazbou) s výkonem 1 až 10 mW.

Isolátor slouží k jednosměrnému propouštění světla. Zabraňuje tedy odrazům světla vracet se do laseru.

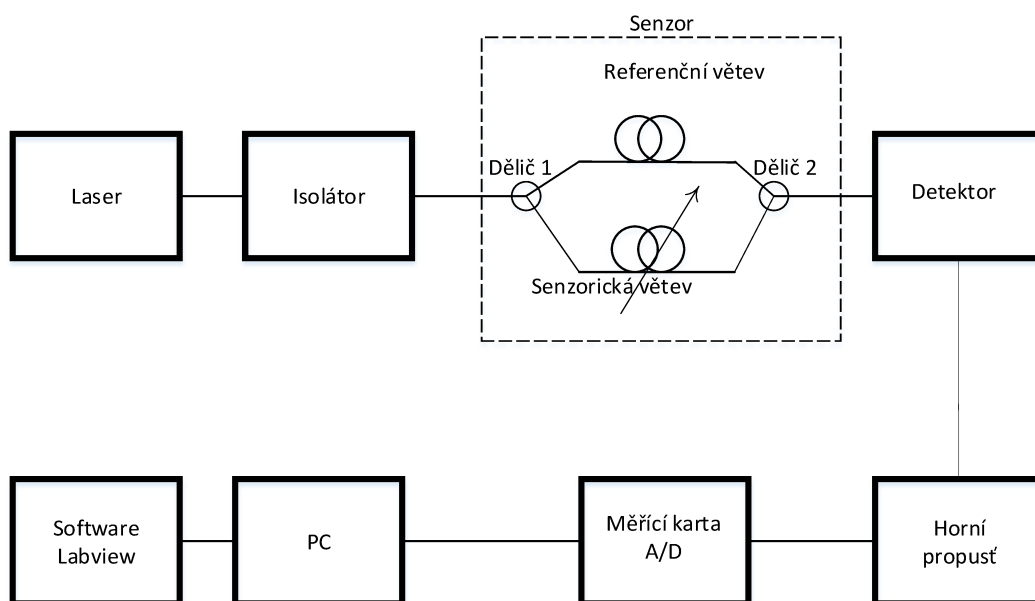
Ke snímání světelného paprsku a jeho převod na napětí po průchodu senzorem nám slouží detektor Thorlabs PbSe (Plumbum, Selenium - Olovo a selen).

Horní propust', nám slouží, k zadržování signálů s nižší frekvencí než potřebujeme. V mé měřicí soustavě má horní propust' hodnotu f_0 nastavenou na 8Hz.

Měřicí karta, kterou používám, je National Instruments NI USB 6210.

Počítač, který nám slouží k zobrazování výsledků, využívá software Labview 2014.

schéma:



Obrázek 2.1: Kompletní schéma využité při měření vláknově optického M-Z interferometru

2.1.2 Popis konstrukce senzoru



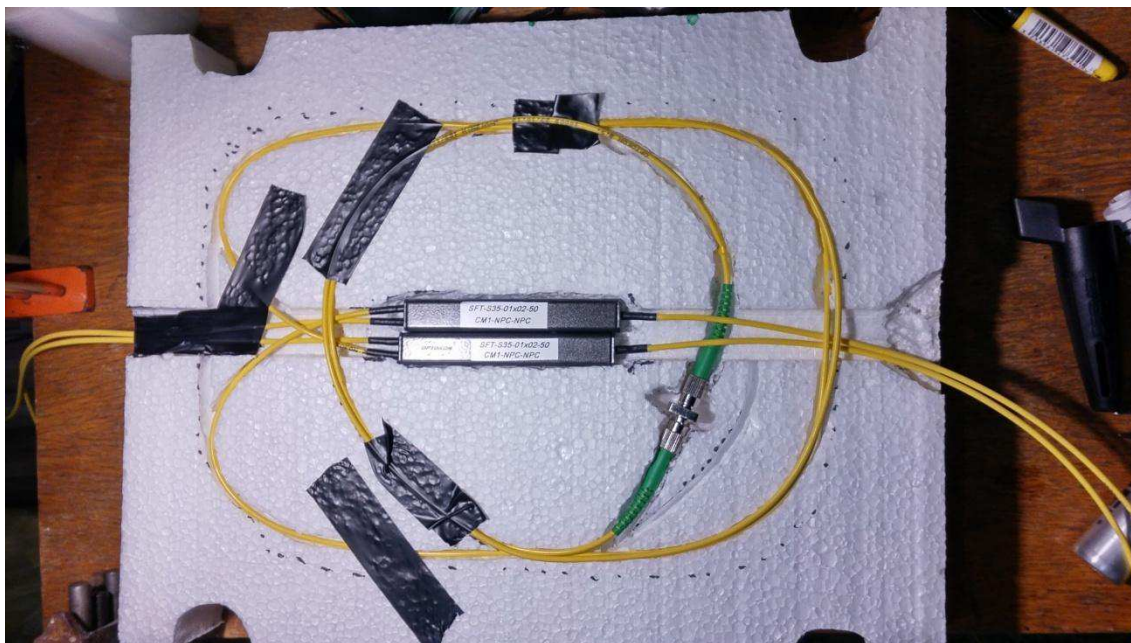
Obrázek 2.2: Zde je ukázaná plastová bedna, která je použita jako ochrana vnitřní struktury, ale také pomáhá přenášet vibrace do senzorické části obvodu.



Obrázek 2.3: Zde je ukázaný polystyren, který slouží jako izolace referenční části vnitřního obvodu. Polystyren jsem vyříznul tak, aby přesně pasoval do již zmíněné bedny.



Obrázek 2.4: V jedné desce polystyrenu jsem plynovou páječkou vypálil otvor pro uložení děličů a referenční části obvodu.



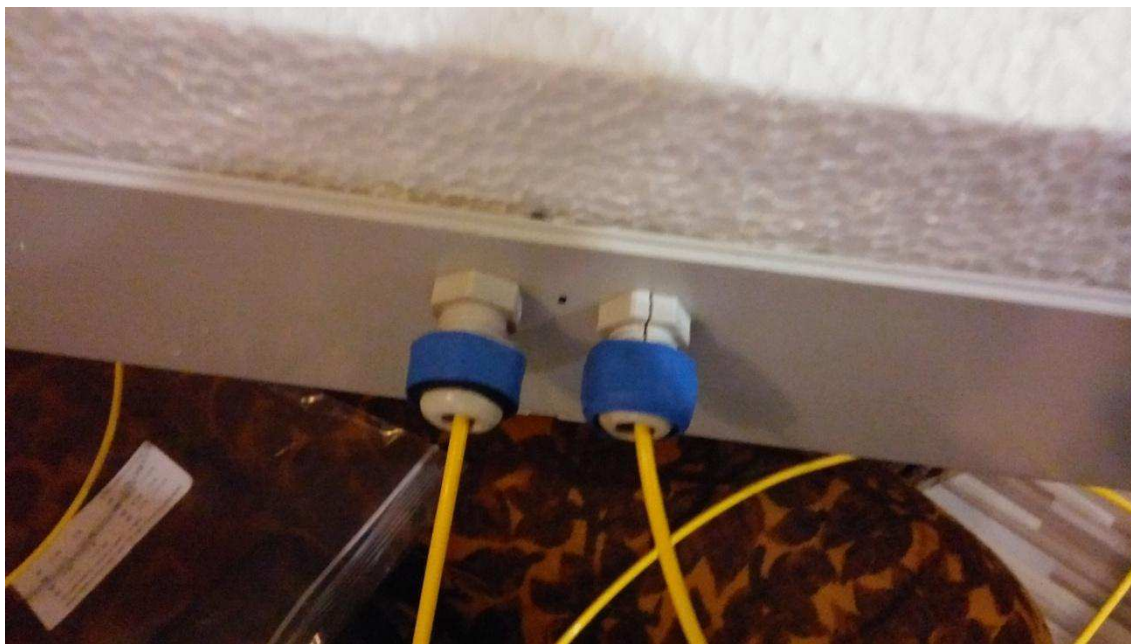
Obrázek 2.5: Zde je příprava uložení vnitřní části.



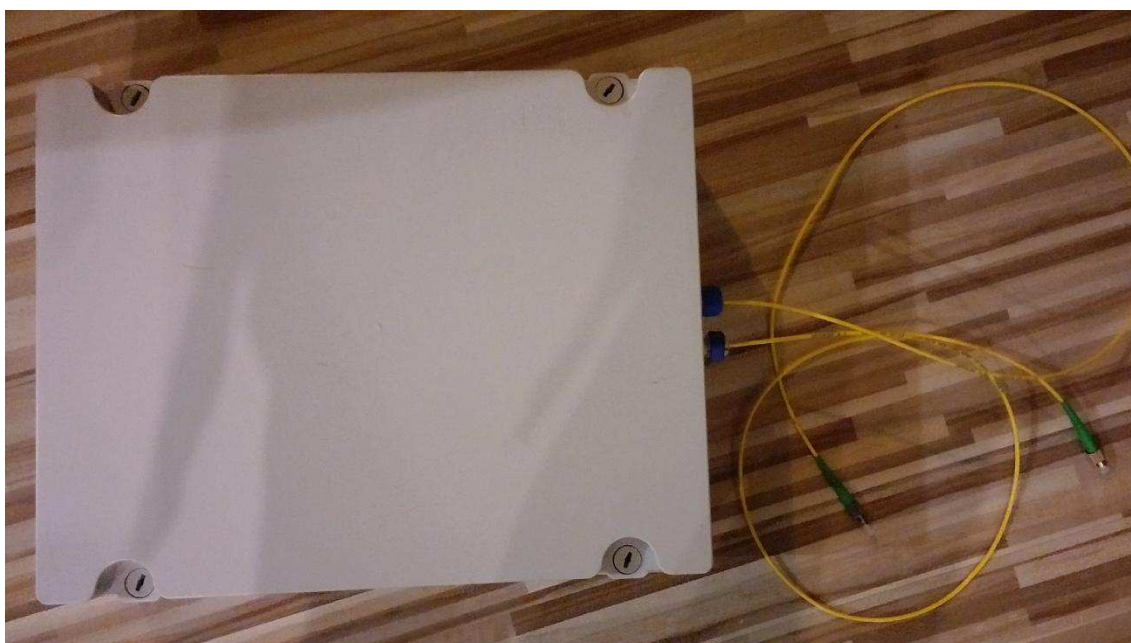
Obrázek 2.6: Na tomto obrázku už je uložení referenční části v polystyrenu zcela hotové.



Obrázek 2.7: Zde je vidět senzorická část a v pravé části obrázku si můžeme povšimnout i vyříznutí drážek v polystyrenu aby ohyby vláken nebyly příliš velké.



Obrázek 2.8: Toto jsou plastové průchodky, které slouží k utěsnění senzoru proti přírodním vlivům.

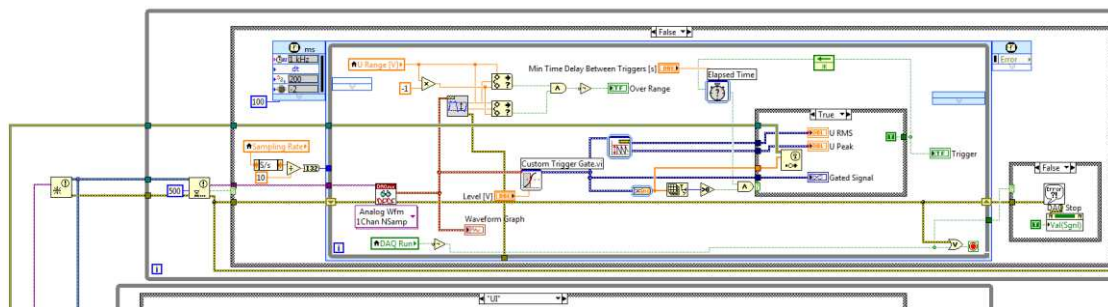


Obrázek 2.9: Takto vypadá složený senzor

2.2 Zpracování signálu

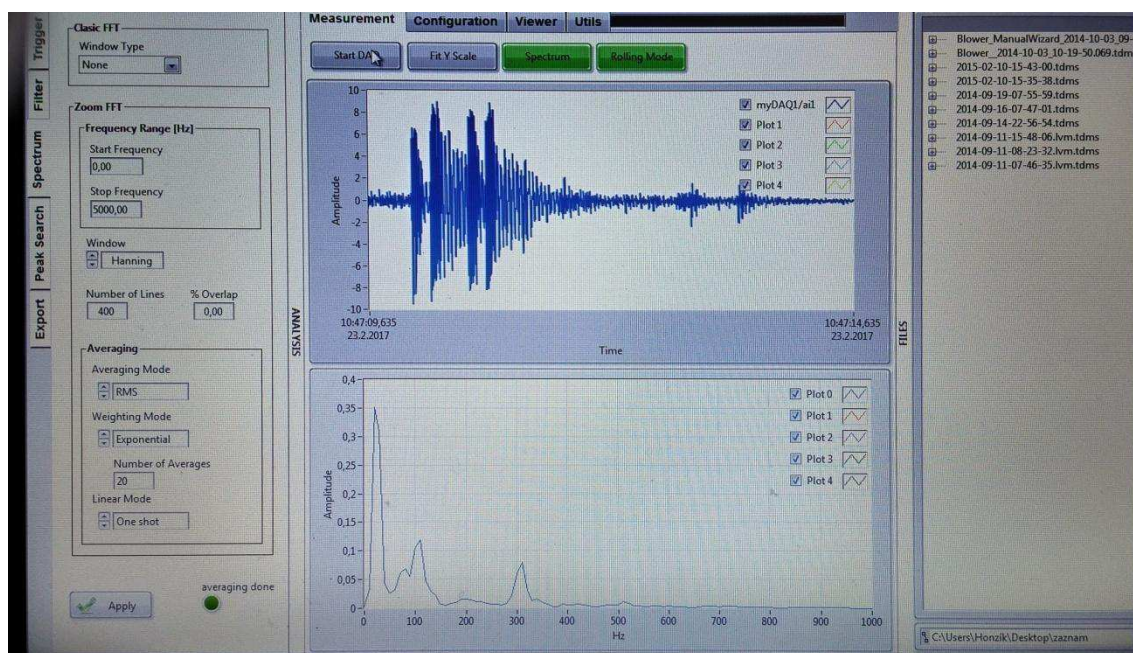
Ze schématu, které jsem již dříve uvedl, je vidět, že ze senzoru který jsem vyrobil, dál signál putuje do detektoru, kde se převede z optického na elektrický. Tento signál dále prochází přes filtr sloužící k odfiltrování stejnosměrné složky do 8Hz. A potom dále do měřicí karty od National Instruments napojenou do počítače přes USB. V počítači tento signál zpracováváme v programu vytvořeném v LabView. Pro vyhodnocení informací z měřicí karty je v tomto programu mnoho funkcí, které nám usnadňují zobrazení požadovaného signálu. Mezi jednodušší funkce patří třeba

změna rozsahu zobrazovaných hodnot. A mezi složitější funkce patří například nastavení filtrů, spouštění nebo také automatizace měření. Tento program nám taky umožňuje zaznamenané výsledky uložit do souboru.



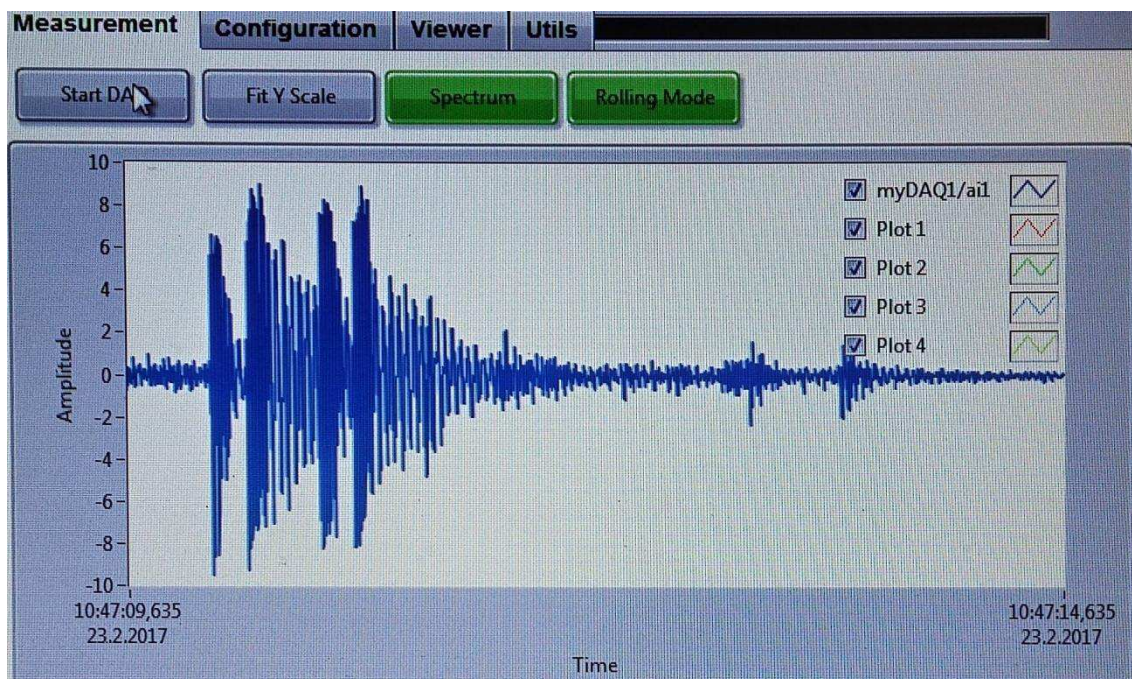
Obrázek 2.10: Část struktury aplikace.

2.2.1 Testování funkčnosti senzoru Vlastní měření



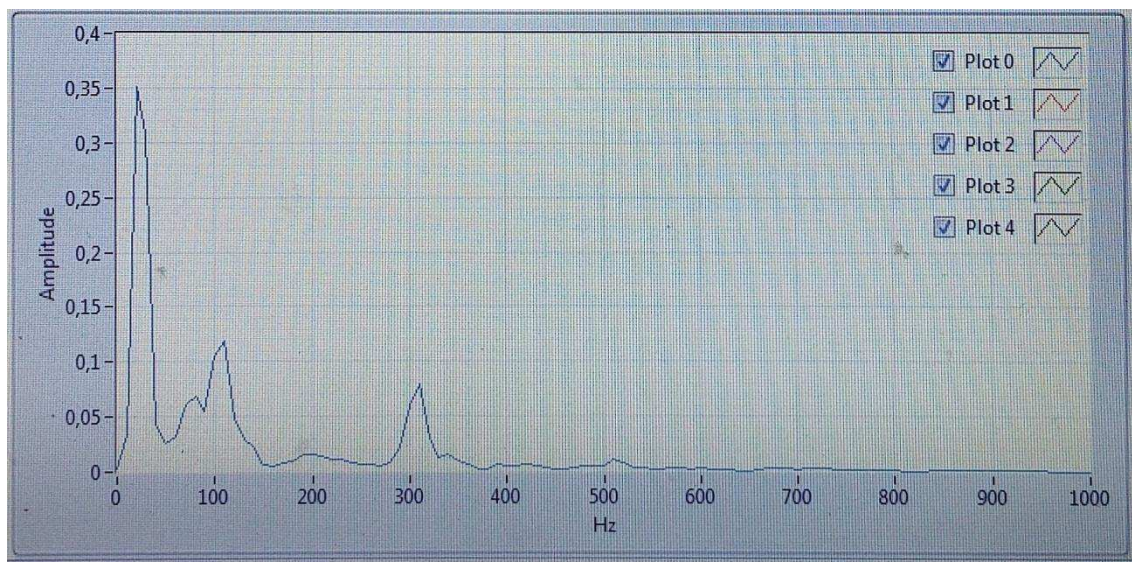
Obrázek 2.11: Hlavní okno aplikace

Zde je vidět náhled na celé okno hlavní aplikace signálního analyzáru. A je zde i ukázána funkčnost senzoru znázorněna vytvořením vibrační odezvy přibližně dvacet pět centimetrů od senzoru.



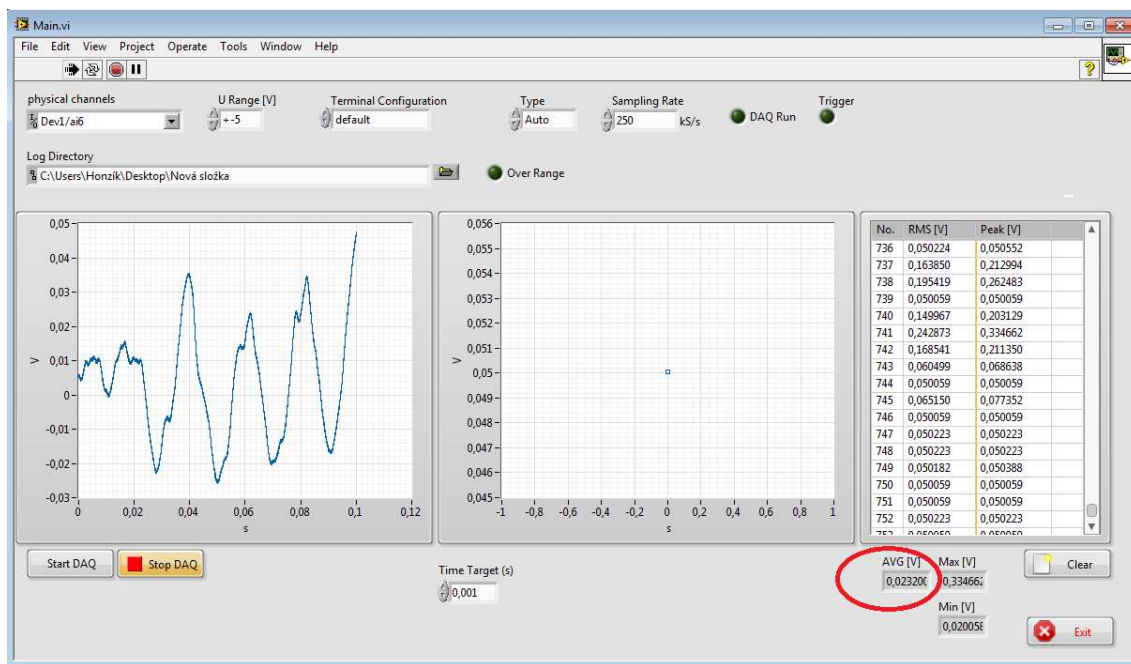
Obrázek 2.12: Průběh signálu v závislosti na čase

Zde můžeme vidět graf zobrazující měřený signál v závislosti na čase. Amplitudy, které jsou zobrazeny, jsou úmyslně způsobeny testováním senzoru pomocí vibrační odezvy. Podle této části budeme nastavovat spouštění měřeného signálu tak, aby zaznamenání nastalo pouze při námi určené hodnotě. Pokud toto nenastavíme, tak se nám do měření zaznamená i ruch z okolí.



Obrázek 2.13: frekvenční spektrum

Testováním senzoru pomocí vibrační odezvy senzoru. Graf zobrazuje frekvenční odezvu a potvrzuje, že vibrační odezva se pohybuje v nízkých kmitočtech.

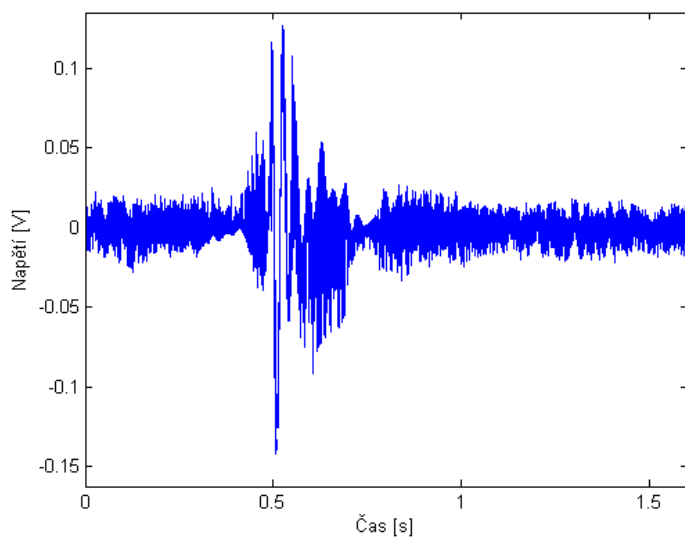


Obrázek 2.14: Aplikace pro dlouhodobé měření

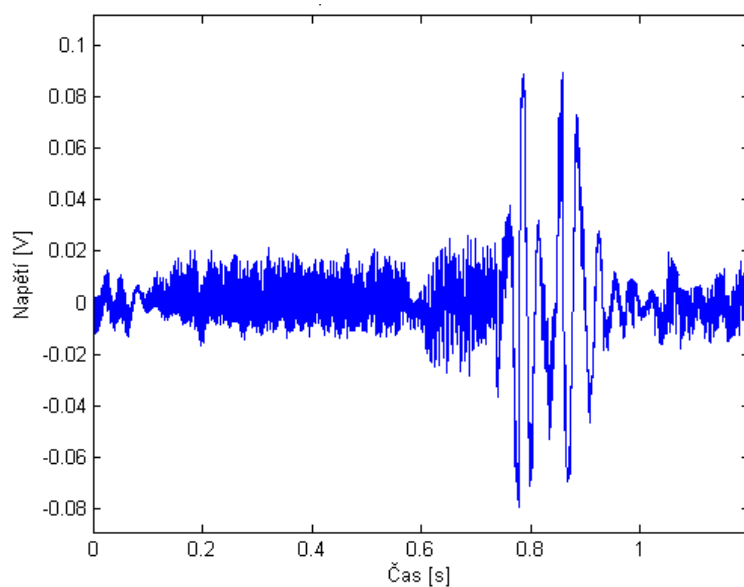
Zde je zobrazená aplikace pro dlouhodobé měření, která je na obrázku nastavena na měření šumového pozadí. To znamená, že spouštění je nastaveno na velmi nízkou úroveň. Výsledky jednotlivých vzorků se zobrazují v pravé části aplikace. Toto měření jsme nechali běžet 30 minut kontinuálně v externím prostředí před samotným měřením průjezdu automobilů. Výsledná průměrná hodnota šumového pozadí (nežádoucích interferencí) způsobených vlivem vnějšího prostředí jako je vítr, tlak, okolní provoz apod. Výsledná hodnota byla stanovena 0,02 V. Celkový počet vzorků jsme za 30 minut měření získali cca 1000.

2.2.2 Provedené praktické měření vozidel

Toto měření probíhalo tak, že jsme senzor položili na kraj cesty a autem jsme projížděli kolem senzoru. Takto jsme udělali alespoň dvacet pět průjezdů u každého vozidla. Ve všech případech byla detekce stoprocentní.



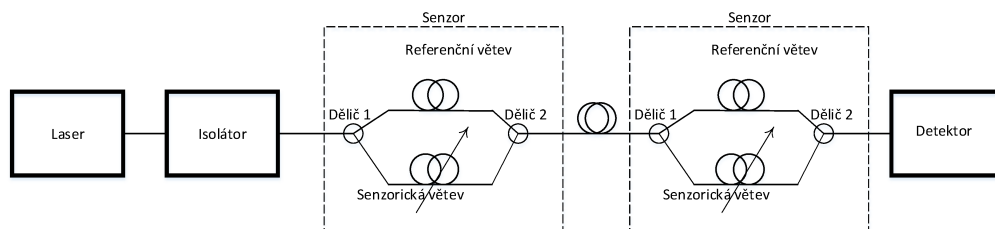
Obrázek 2.15: Průjezd vozu Škoda Felicia a její amplitudová odezva v závislosti na čase



Obrázek 2.16: Průjezd vozu Peugeot 206 a jeho amplitudová odezva v závislosti na čase.

Vzhledem k velikosti grafických záznamů jsou další záznamy z provedených měření součástí přílohy. Tyto měření byly provedeny s vyšším výkonem zdroje záření.,

2.2.3 Měření rychlosti vozidel

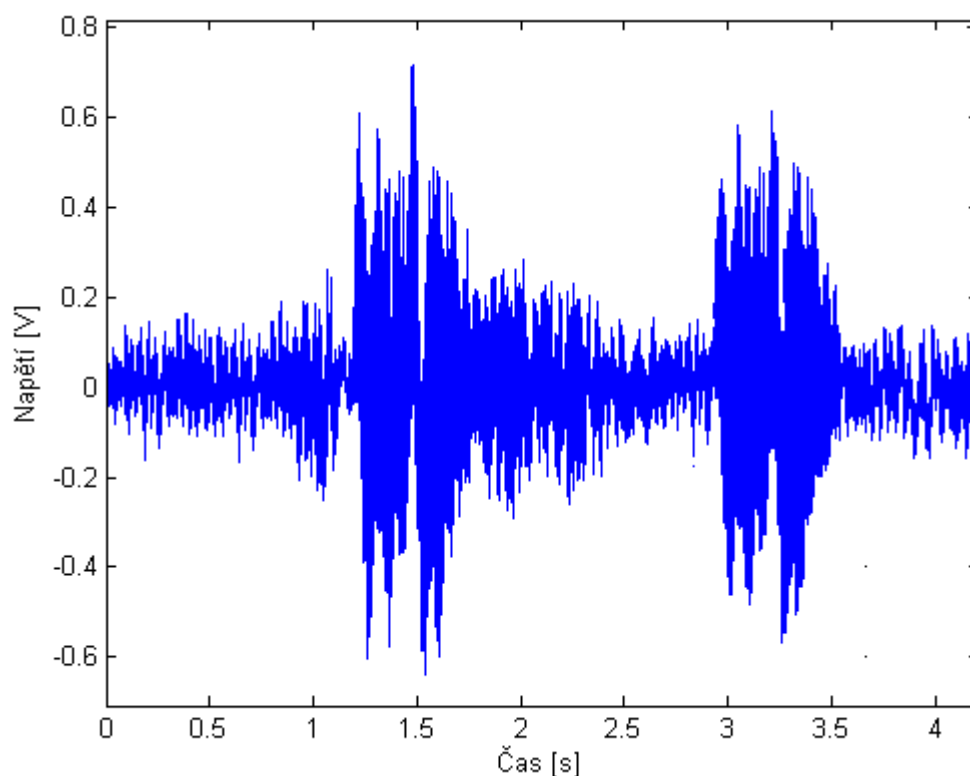


Obrázek 2.17: Zjednodušené schéma pro měření rychlosti vozidel.

Toto měření využívá dvou totožných senzorických jednotek v pevně definované vzdálenosti a rychlost je vypočtena na základě časového rozdílu průjezdu automobilů během průjezdu kolem obou senzorických jednotek. Testovacím místem pro měření rychlosti byl areál školy VŠB, proto byla rychlost vozidel do 36 kilometrů za hodinu. Při měření vyšších rychlostí je třeba uvažovat o delší rozjezdové a brzdě dráze což s ohledem na bezpečnost v areálu školy nebylo vhodné.

Rychlost [km/h] (GPS)	Rychlost – Vyhodnocená [km/h]	Rozdíl [km/h]
10	11,11	0,78
14	15,81	1,81
22	22,96	0,96
27	28,41	1,41
32	33,77	1,77
36	35,49	0,51

Tabulka 1.1: Tabulka naměřených a vyhodnocených rychlostí, jako reference bylo použito GPS zařízení.



Obrázek 2.18: Typický záznam měření rychlosti testovacího vozidla.

Typický záznam měření rychlosti, větší amplitudy jsme dosáhli navýšením výkonu zdroje záření na úroveň 10 mW.

Na základě vyhodnocení maximální amplitudy dvou detekovaných signálů se stanovily dva časové body. Díky známé vzdálenosti senzorů od sebe se vypočítala rychlost. Vzdálenost mezi senzory byla 20m. Obrázek ukazuje záznam pro měření rychlosti 11,11 km/h. Časové stopy (amplitudové maxima) byly detekovány v časech 1,5s a 3,3s. Rozdíl mezi nimi je 1,8s.

$$\text{Dle vzorce: } v_{\text{vozidla}} = \frac{S_{\text{vzdálenost mezi senzory}}}{t_{\text{čas průjezdu}}}$$

$$V = 20 / 1,8 = 11,11 \text{ km/h viz tabulka.}$$

3 Závěr

V první části jsem zpracoval teorii potřebnou pro pochopení fungování vláknově optického Mach-Zehnderova interferometru. Zde jsem také popsal rozdíly optických vláken s jejich omezeními a problémy. Dále jsem stručně popsal další typy interferometrů.

V následující praktické části jsem se zabýval samotnou konstrukcí senzoru, který jsem testoval. Senzorů jsem v průběhu vývoje vyrobil více, než se mi podařilo sestavit senzor dostatečně citlivý na vibrační odezvy způsobené projíždějícími vozidly, tak aby detekce dosahovala co nejvyšší úrovně. Zkoušel jsem použít různé typy optických vláken a také měnit podklad sensorické větve.

Po dosažení dostatečné kvality senzoru jsem provedl měření šumového pozadí. Toto měření vždy trvalo nejméně půl hodiny a na jeho základě jsem stanovil uroveň šumového pozadí. Teprve potom bylo možné zahájit testování detekce vozidel. Testování probíhalo tak, že senzor byl vždy umístěn na okraji vozovky a vozidla kolem tohoto senzoru projížděla ve vzdálenosti přibližně jeden metr. Testování jsem prováděl s různými vozidly a také na různých místech. Detekce vozidel zaznamenala stoprocentní úspěšnost. Po experimentu s detekcí vozidel bylo nezbytné zajistit měření rychlosti. Tohoto jsem dosáhl přidáním druhé fyzicky stejné jednotky, tak aby byly za sebou ve známé vzdálenosti stanovené na hodnotu dvacet metrů. Při průjezdu vozidla jsem zjistil rozdíl naměřených údajů o čase průjezdu mezi senzory, ze kterých jsem dopočítal rychlost. Vyhodnocená rychlost se lišila nejvýše o 1,81 kilometrů za hodinu od rychlosti předpokládané. Jako zdroj předpokládané rychlosti sloužila GPS.

4 Použitá Literatura:

- [1] Dušek, Martin a Mazanec, Michal. Ústav automatizace a měřicí techniky VUT v Brně [Online] 29. Června 2012. [Citace: 14. říjen 2016.] http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf
- [2] Centrum odborné přípravy technické Kroměříž. [Online] 2009 [Citace: 15. říjen 2016.] <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=5274>
- [3] Jandora, Radek. Neoficiální internetová fakulta všeho možného [Online] [Citace: 16. říjen 2016.] <http://radek.jandora.sweb.cz/f19.htm>
- [4] David, Břeň. aldebaran [Online] [Citace: 16. říjen 2016.] http://www.aldebaran.cz/elmg/kurz_13_maxw.pdf
- [5] Lukáš, Dalibor Katedra aplikované matematiky VŠB [Online] 2007 [Citace: 20. říjen 2016.] http://homel.vsb.cz/~luk76/Teaching/MMEP/Fyzika_Maxwellovych_rovnic.pdf
- [6] Plexo. pctuning. [Online] 22. leden 2008. [Citace: 21. říjen 2016.] http://pctuning.tyden.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=9994&catid=32&Itemid=72
- [7] Bubník, Lukáš a Knajbl, Jiří a Mazuch, Petr Optoelektrotechnika [Online] 2015 [Citace: 24.říjen 2016.] <https://publi.cz/books/185/06.html>
- [8] Bubník, Lukáš a Knajbl, Jiří a Mazuch, Petr Optoelektrotechnika [Online] 2015 [Citace: 24.říjen 2016.] <https://publi.cz/books/185/05.html>
- [9] Mach, Pavel ČVUT Výroba Optických Vlákén [Online] [Citace: 24. říjen 2016.] <http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Opticka%20vlakna.pdf>
- [10] Reichl, Jaroslav a Všetická, Martin. Encyklopedie fyziky. [Online] [Citace: 1. listopad 2016.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/452-skladani-vlneni>
- [11] Reichl, Jaroslav a Všetická, Martin. Encyklopedie fyziky. [Online] [Citace: 1. listopad 2016.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/167-interference-vlneni>
- [12] Masarykova Universita [Online] 2010 [Citace: 2. listopad 2016.] https://is.muni.cz/el/1431/podzim2010/F3060/10_Koherence.txt
- [13] Týma, Ondřej. Západočeská Univerzita v Plzni [Online] 2016 [Citace: 2. listopad 2016.] <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/23128/1/BAKALARSKA%20PRACE%20-%20ONDREJ%20TYMA%20%28EL.%20OVERZE%20SE%20ZADANIM%29.pdf>
- [14] Kamil. Fyzika III - Skalární Vlnová Optika [Online] 2010 [Citace: 2. listopad 2016.] http://nanotechnologie.vsb.cz/Studiumbc/fyzikaIII_optika_2.pdf
- [15] Lukáš, Michal. Elektrověue Laserové diody [Online] 2002 [Citace: 3. listopad 2016.] <http://www.elektrověue.cz/clanky/02023/index.html>

- [16] Rýc, Jan. Vysoké Učení Technické [Online] 2011 [Citace: 3. Listopad 2016]
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38584#subsection.15
- [17] Kuběna, Josef. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity Aplikovaná optika [Online] [Citace: 3. Listopad 2016]
<https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0ahUK EwjC5uvWx5vQA hUBzRQKHb46BBIQFgg4MAY&url=http%3A%2F%2Fwww.medi.muni.cz%2Focnipek%2Faplikoptl.ppt&usq=AFQjCNHmeoH1BaBkYCYZBnxAs7b3pa3HCvA&sig2=V62ja-L3IoOqkbqixgEMuw&cad=rja>
- [18] Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT [Online] [Citace: 5. listopad 2016.] http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_03.pdf
- [19] Woodford, Chris. Interferometers [Online] 2016 [Citace: 8. listopad 2016.] <http://www.explainthatstuff.com/howinterferometerswork.html>
- [20] Pavelek, Milan. Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně [Online] 2007 [Citace: 9. listopad 2016.] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1304.htm>
- [21] Šiška, Petr a kolektiv. Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB TUO Ostrava Nekomunikační Aplikace Optických vláken [Online] [Citace: 9. listopad 2016.] <http://ictpropraxi.vsb.cz/materials/Nekomunika%C4%8Dn%C3%AD%20aplikace%20optick%C3%BDch%20vl%C3%A1ken/Nekomunika%C4%8Dn%C3%AD%20aplikace%20optick%C3%BDch%20vl%C3%A1ken.pdf>
- [22] Mendelova Univerzita v Brně [Online] [Citace: 12. listopad 2016.] https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=52958

5 Seznam příloh

Příloha A: Grafické záznamy z dalších měření

Příloha A: *Grafické záznamy průjezdů vozidel z dalších měření*

